

**ANALISIS KERAPATAN BETON DENGAN MENGGUNAKAN CEPAT  
RAMBAT DAN *TRANSMISSION TIME* PADA ALAT UPV  
(*ULTRASONIC PULSE VELOCITY*)**

**SKRIPSI  
TEKNIK SIPIL**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
Memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**ALBERTUS EKY YULIAN  
NIM. 145060100111004**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2018**

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISIS KERAPATAN BETON DENGAN MENGGUNAKAN CEPAT RAMBAT DAN *TRANSMISSION TIME* PADA ALAT UPV (*ULTRASONIC PULSE VELOCITY*)

#### SKRIPSI

TEKNIK SIPIL KONSENTRASI STRUKTUR

Diajukan untuk memenuhi sebagian  
persyaratan memperoleh gelar Serjana Teknik



Disusun oleh:

**ALBERTUS EKY YULIAN**

**145060100111004**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
pada tanggal 9 Januari 2018

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dr. Eng. Indradi W., ST, M.Eng (Prac)**  
NIP. 198102202006041002

**Christin Remayanti N., ST, MT**  
NIP. 198403252015042001

Mengetahui  
**Ketua Program Studi S1**

**Dr. Eng Indradi W, ST. M.Eng (Prac)**  
NIP. 19810220 200604 1 002

## HALAMAN IDENTITAS PENGUJI SKRIPSI

Judul Skripsi :

Analisis Kerapatan Beton dengan Menggunakan Cepat Rambat dan Transmission Time Pada Alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*)

Nama Mahasiswa : Albertus Eky Yulian

NIM : 145060100111004

Program Studi : Teknik Sipil

Minat : Struktur

Tim Dosen Penguji :

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Lilya Susanti, ST., MT.

Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Indradi W., ST., M.Eng (Prac)

Dosen Penguji 3 : Christin Remayanti N., ST., MT.

Tanggal Ujian : 4 Januari 2018

SK Penguji : 1771/UN10.F07/SK/2017

## **PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah hasil pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 16 Januari 2017

Mahasiswa,

Albertus Eky Yulian

NIM. 145060100111004

## **RIWAYAT HIDUP**

Albertus Eky Yulian, lahir di Malang, 26 Juli 1996, anak kedua dari Bapak Markus Basuki dan Ibu Kristina Sri Wigati. Menjalani pendidikan sekolah dasar di SD Katolik Mardi Wiyata I Malang, lalu melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMP Katolik Frateran Celaket 21 Malang, dan melanjutkan pendidikan menengah atas di SMA Katolik Frateran Malang dan lulus pada tahun 2014. Kemudian dilanjutkan dengan mengambil pendidikan sarjana di Universitas Brawijaya Jurusan Teknik Sipil dan lulus pada tahun 2018.

Selama kuliah aktif mengikuti beberapa kepanitiaan serta perlombaan skala nasional. Perlombaan di tingkat nasional yang diikuti adalah Kompetisi Jembatan Indonesia Ke-13 Tahun 2017 yang diselenggarakan oleh Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi di Politeknik Negeri Malang. Capaian yang berhasil diraih adalah Juara 2 untuk Kategori Lomba Jembatan Canai Dingin Pejalan Kaki.

Malang, Januari 2018

Penulis

*Kupersembahkan untuk:*

*Bapak dan Ibu, serta Kakak dan Adik Tercinta*

## KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan segala anugerah-Nya dan rahmat-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“ANALISIS KERAPATAN BETON DENGAN MENGGUNAKAN CEPAT RAMBAT DAN TRANSMISSION TIME PADA ALAT UPV (ULTRASONIC PULSE VELOCITY)”** dengan baik dan lancar. Skripsi ini merupakan persyaratan terakhir akademis yang telah ditetapkan untuk menyelesaikan tahap sarjana di **Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya**.

Tentunya kami dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar karena bantuan dari banyak pihak. Karena itu, kami ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Dr. Eng. Alwafi Pujiraharjo, ST, MT selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
2. Dr. Eng. Eva Arifi, ST, MT selaku Sekretaris Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
3. Dr. Eng Indradi W, ST, M..Eng (Prac) selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil Universitas Brawijaya dan Dosen Pembimbing 1 Skripsi.
4. Christin Remayanti N., ST, MT selaku Dosen Pembimbing 2 Skripsi.
5. Dr. Ir. Wisnumurti, MT selaku KKDK Struktur.
6. Segenap dosen dan Karyawan di Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
7. Pak Sugeng dan Mas Dino dari Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi yang selalu membantu dalam penelitian di laboratorium.
8. Keluarga Saya yang Selalu Memberi Semangat dan Selalu Mendukung.
9. Teman-teman dalam tim skripsi Skripsweet (Agus, Wikha, Kamil, Ime, Teguh dan Gandi) yang telah bekerja bersama-sama dalam mengerjakan skripsi dari awal hingga akhir.
10. Teman-teman dalam tim KJI Canai Abimanyu (Nabil, Azka, dan Ryan) beserta kru dan AMERA.
11. Teman-teman di Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

12. Dan semua pihak yang telah membantu kelancaran penulisan skripsi ini, yang tidak dapat kami sebutkan satu per satu.

Kami menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kesempurnaan, untuk itu segala kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Akhir kata, kami berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Malang, Januari 2018

Albertus Eky Yulian



## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>ix</b>
<b>RINGKASAN.....</b>	<b>xi</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	2
1.3 Rumusan Masalah.....	2
1.4 Batasan Masalah .....	2
1.5 Tujuan .....	3
1.6 Manfaat .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Material Beton .....	5
2.2 Sifat-Sifat Beton .....	5
2.2.1 Kuat Tekan Beton.....	5
2.2.2 Hubungan Kuat Tekan dengan Kerapatan Beton .....	6
2.2.3 Modulus Elastis Statis .....	7
2.2.4 Modulus Elastis Dinamis.....	7
2.2.5 Rasio Poisson.....	7
2.2 Pengujian Kuat Tekan dengan Metode <i>Rebound Hammer</i> .....	8
2.3 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</i> .....	8
2.3.1 Jenis-Jenis Gelombang Mekanik .....	9
2.3.2 Perambatan Gelombang.....	11

2.3.3	Metode Pengujian.....	12
2.3.4	Hubungan Cepat Rambat Gelombang dengan Kuat Tekan Beton.....	16
2.3.5	Prinsip Analisis Bentuk Gelombang ( <i>Waveform</i> ) .....	17
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>19</b>
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian.....	19
3.2	Bahan Penelitian.....	19
3.2.1	<i>Pozzolan Portland Cement</i> .....	19
3.2.2	Agregat.....	19
3.2.3	Air.....	19
3.3	Peralatan Penelitian .....	19
3.3.1	Saringan.....	20
3.3.2	Timbangan.....	20
3.3.3	Mesin Pengaduk Beton.....	20
3.3.4	Cetakan Benda Uji .....	20
3.3.5	Alat Uji Tekan.....	20
3.3.6	UPV Test.....	20
3.3.7	Alat Bantu Lainnya .....	20
3.4	Tahapan Penelitian .....	21
3.5	Rancangan Penelitian .....	22
3.6	Variabel Penelitian .....	22
3.7	Prosedur Penelitian.....	22
3.7.1	Pengujian Bahan Dasar .....	22
3.7.2	Pembuatan Benda Uji.....	23
3.7.3	Perawatan Benda Uji.....	23
3.7.4	Pengujian UPV.....	23
3.7.5	Pengujian Hammer.....	25
3.7.6	Pengujian Kuat Tekan .....	25

3.8	Metode Analisis .....	26
3.8.1	Pengumpulan Data.....	26
3.8.2	Pengolahan Data .....	28
3.8.3	Hipotesis .....	28
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>29</b>
4.1	Hasil Pengujian Bahan Penyusun Beton.....	29
4.1.1	Air.....	29
4.1.2	Semen .....	29
4.1.3	Agregat Kasar .....	29
4.1.4	Agregat Halus .....	29
4.2	Pembuatan Benda Uji .....	30
4.2.1	Perencanaan Campuran ( <i>Mix Design</i> ) Benda Uji.....	30
4.2.3	Hasil Pengujian Kuat Tekan Menggunakan Uji Tekan .....	31
4.2.4	Hasil Pengujian Kuat Tekan Menggunakan Uji <i>Hammer</i> .....	34
4.3	Hasil Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV) .....	36
4.3.1	Pengukuran dengan Moda TT ( <i>Transmission Time</i> ) .....	38
4.3.2	Pengukuran dengan Moda PV ( <i>Pulse Velocity</i> ) .....	39
4.3.3	Seleksi Data yang Menyimpang.....	41
4.4	Pengambilan Sampel Beton Acuan.....	49
4.5	Hubungan Antara Kuat Tekan Beton dengan Parameter Gelombang .....	51
<b>BAB V PENUTUP .....</b>		<b>59</b>
5.1	KESIMPULAN.....	59
5.2	SARAN .....	60
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>61</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>63</b>

## DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Jenis gelombang mekanik longitudinal berdasarkan frekuensi .....	8
Tabel 2.2	Kualifikasi kualitas beton berdasarkan cepat rambat gelombang .....	15
Tabel 2.3	Hubungan kuat tekan beton dan UPV .....	16
Tabel 3.1	Rancangan penelitian beton.....	22
Tabel 3.2	Form Pengujian Kuat Tekan Beton Silinder.....	26
Tabel 3.3	Form Parameter-Parameter Gelombang .....	27
Tabel 4.1	Hasil pemeriksaan agregat kasar .....	29
Tabel 4.2	Hasil pemeriksaan agregat halus .....	30
Tabel 4.3	Kebutuhan bahan untuk campuran benda uji .....	30
Tabel 4.4	Hasil pengujian kuat tekan silinder menggunakan <i>compression test machine</i> .....	32
Tabel 4.5	Hasil pengujian kuat tekan kubus menggunakan <i>compression test machine</i> .....	33
Tabel 4.6	Hasil pengujian kuat tekan menggunakan <i>hammer test</i> .....	34
Tabel 4.7	Rekapitulasi data <i>waveform</i> TT .....	38
Tabel 4.8	Rekapitulasi data <i>waveform</i> PV .....	40
Tabel 4.9	Seleksi data parameter $t_0$ <i>waveform</i> TT .....	42
Tabel 4.10	Seleksi data parameter $t_0$ <i>waveform</i> PV .....	44
Tabel 4.11	Seleksi data parameter $A_1$ <i>waveform</i> TT .....	46
Tabel 4.12	Seleksi data parameter $A_1$ <i>waveform</i> PV .....	48
Tabel 4.13	Perbandingan Kuat Tekan Hasil Uji Tekan dan Uji Hammer .....	50
Tabel 4.14	Rekapitulasi kuat tekan serta parameter $t_0$ dan $A_1$ untuk <i>waveform</i> TT.....	52
Tabel 4.15	Rekapitulasi kuat tekan serta parameter $t_0$ dan $A_1$ untuk <i>waveform</i> PV .....	53

## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Korelasi Kuat Tekan 28 Hari dengan Kerapatan .....	6
Gambar 2.2	Bagian-bagian dan prinsip kerja alat uji hammer .....	8
Gambar 2.3	Pergerakan partikel pada gelombang <i>P-waves</i> (kiri) dan <i>S-waves</i> (kanan). ..	10
Gambar 2.4	Pergerakan partikel pada gelombang permukaan: <i>Love-waves</i> (kiri) dan <i>Rayleigh-waves</i> (kanan). .....	11
Gambar 2.5	Jenis-jenis gelombang pada alat pembaca gelombang.....	11
Gambar 2.6	Diagram skematik dari instrumen UPV .....	13
Gambar 2.7	Konfigurasi pengujian UPV. (A) <i>Direct method</i> , (B) <i>semi-direct method</i> , dan (C) <i>indirect method</i> .....	14
Gambar 2.8	Perubahan cepat rambat pada beton <i>plain</i> dan beton dengan <i>admixture</i> terhadap umur beton .....	16
Gambar 2.9	Bentuk gelombang dari beton acuan yang telah diketahui mutunya .....	17
Gambar 2.10	Perbandingan parameter beton yang diuji dengan beton acuan.....	18
Gambar 3.1	Diagram alir tahapan penelitian .....	21
Gambar 3.2	Skema titik pengujian UPV pada benda uji .....	24
Gambar 3.3	Proses kalibrasi awal alat uji UPV.....	24
Gambar 3.4	Alat pengujian kuat tekan beton .....	25
Gambar 3.5	Tampilan data hasil pengujian UPV menggunakan aplikasi PL-Link.....	26
Gambar 4.1	Kuat tekan sampel beton silinder dengan <i>compression test</i> .....	33
Gambar 4.2	Perbandingan kuat tekan dengan <i>compression test</i> dan <i>hammer test</i> .....	35
Gambar 4.3	Contoh pengambilan parameter $t_0$ .....	36
Gambar 4.4	Contoh pengambilan parameter $t_1$ dan $A_1$ .....	37
Gambar 4.5	Contoh pengambilan parameter $t_{maks}$ dan $A_{maks}$ .....	37
Gambar 4.6	Contoh pengambilan parameter $t_2$ dan $A_2$ .....	37
Gambar 4.7	<i>Waveform</i> UPV pada sampel B3 (TT) .....	51
Gambar 4.8	<i>Waveform</i> UPV pada sampel B3 (PV).....	51
Gambar 4.9	Hubungan kuat tekan beton dengan $t_0$ (Metode TT) .....	54
Gambar 4.10	Hubungan kuat tekan beton dengan $A_1$ (Metode TT) .....	55

Gambar 4.11 Hubungan kuat tekan beton dengan $t_0$ (Metode PV) .....	55
Gambar 4.12 Hubungan kuat tekan beton dengan $A_1$ (Metode PV).....	56
Gambar 4.13 Prosentase sebaran data di setiap kuadran (Metode TT) .....	57
Gambar 4.14 Prosentase sebaran data di setiap kuadran (Metode TT) .....	57

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Analisis Gradasi Agregat .....	63
Lampiran 2	Berat Jenis dan Penyerapan Agregat.....	65
Lampiran 3	Berat Isi Agregat .....	66
Lampiran 4	Kadar Air Agregat.....	67
Lampiran 5	Perancangan Campuran Beton .....	68
Lampiran 6	Hasil Pengujian Kuat Tekan Menggunakan <i>Compression Test Machine</i> ....	73
Lampiran 7	Hasil Pengujian Kuat Tekan Menggunakan <i>Hammer Test</i> .....	75
Lampiran 8	Rekapitulasi Parameter Gelombang pada Alat UPV .....	76
Lampiran 9	Pengelompokan Berdasarkan Hubungan $t_0$ dengan $A_1$ .....	85
Lampiran 10	Pengelompokan Berdasarkan Hubungan $t_0$ dan $A_1$ terhadap Kuat Tekan..	87
Lampiran 11	Transformasi Hilbert dari <i>Waveform</i> Hasil Pengujian UPV .....	89
Lampiran 11	<i>Waveform</i> Hasil Pengujian UPV .....	97

(halaman ini sengaja dikosongkan)



## RINGKASAN

**Albertus Eky Yulian**, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2018, *Analisis Kerapatan Beton dengan Menggunakan Cepat Rambat dan Transmission Time pada Alat UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)*, Dosen Pembimbing: Indradi Wijatmiko dan Christin Remayanti N.

Beton adalah material konstruksi yang merupakan campuran dari semen, air, dan agregat. Selain dipengaruhi oleh kualitas bahan-bahan penyusunnya, kekuatan beton juga bergantung pada kualitas pengerjaannya. Sehingga dalam pengawasan pekerjaan beton perlu dilakukan pengujian, salah satunya adalah pengujian UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*). Metode tersebut menggunakan kecepatan dari gelombang ultrasonik (*ultrasonic pulse*) yang merambat melalui beton untuk memperkirakan tingkat kerapatan dari beton. Untuk itu penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi hubungan antara kerapatan dan kuat tekan beton terhadap bentuk gelombang (*waveform*) yang dihasilkan oleh alat UPV.

Pada penelitian ini dilakukan proses analisis kerapatan beton berdasarkan parameter-parameter yang dihasilkan oleh pengujian UPV menggunakan alat PUNDIT PL-200. Parameter-parameter yang diambil dari pengujian UPV antara lain waktu transmisi yaitu waktu yang dibutuhkan gelombang untuk merambat dari transduser pengirim ke transduser penerima serta besarnya amplitudo pertama yang terdeteksi dilihat dari bentuk gelombangnya. Penelitian menggunakan 36 benda uji silinder standar dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Benda uji dibagi menjadi empat variasi berdasarkan komposisi dari campuran beton (*mix design*) dengan kuat tekan rencana 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, dan 35 MPa yang kemudian dilakukan uji tekan dan uji *hammer* untuk mengetahui kuat tekan aktual dari beton tersebut. Dari data-data yang terkumpul tersebut kemudian dilakukan analisis pengaruh kerapatan yang dihasilkan terhadap gelombang hasil pengujian UPV.

Hasil pengujian UPV pada penelitian ini menunjukkan adanya hubungan yang cukup kuat antara kuat tekan aktual dengan waktu transmisi ( $t_0$ ), dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0,5249 dan 0,4953 masing-masing untuk metode *transmission time* (TT) dan *pulse velocity* (PV). Hasil analisis membuktikan bahwa perambatan gelombang memiliki waktu transmisi lebih cepat pada beton yang memiliki kerapatan tinggi dilihat dari kuat tekan aktualnya. Sedangkan parameter amplitudo awal (A1) belum menunjukkan hubungan dengan kuat tekan aktual dilihat dari tidak adanya pola sebaran data yang konsisten. Hal tersebut dipengaruhi oleh ketidakseragaman komposisi dan susunan agregat yang menimbulkan pembacaan amplitudo yang berbeda dalam satu benda uji karena kerapatan beton yang tidak seragam.

Kata kunci: beton, cepat rambat, kerapatan, *ultrasonic pulse*, waktu transmisi.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

## SUMMARY

**Albertus Eky Yulian**, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, January 2018, *Concrete Density Analysis Using Pulse Velocity and Transmission Time on UPV (Ultrasonic Pulse Velocity) Instrument*, Academic Supervisor: Indradi Wijatmiko and Christin Remayanti N.

*Concrete is a construction material that consists of cement, water, and aggregates. In addition to the quality of concrete composing materials, its strength depends on the quality of concrete processing. Then, it's necessary to perform concrete testing in order to evaluate the concrete work, for example, UPV test (Ultrasonic Pulse Velocity). This method uses the velocity of ultrasonic pulses that propagate through concrete medium to estimate the density and strength of concrete material. The purpose of this study is to identify the relationship between density and compressive strength of the concrete and the output waveform generated by UPV instrument.*

*In this study, concrete density was analyzed based on the parameters produced by UPV testing using PUNDIT PL-200 instrument. Those parameters were taken from UPV tests such as transmission time (the time used by ultrasonic pulse to propagate from the transmitter transducer to the receiver transducer) and the magnitude of initial amplitude detected from the waveform. This study used 36 cylinder standard test specimens (15 cm diameter and 30 cm height). Those specimens were divided into 4 groups of variations based on the composition of the concrete mix design with expected compressive strength 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, and 35 MPa. Then compression test and hammer test were performed to find out the actual compressive strength of the concrete specimens. The collected data were analyzed to determine the effect of concrete density on the waveforms generated from UPV testing.*

*The results of the UPV testing in this study indicate a fairly strong relationship between the actual compressive strength and transmission time ( $t_0$ ), with the coefficient of determination are 0,5249 and 0,4953 respectively for transmission time (TT) and pulse velocity (PV) measurement method. Those results prove that the wave propagation has faster transmission time ( $t_0$ ) on the concrete specimens that have a higher density due to its actual compressive strength. While the initial amplitude parameter (AI) does not show any relation with the actual compression strength due to the absence of consistent pattern of its data distribution. The results are influenced by the composition and the gradation of the aggregates that are not uniformly distributed, that will cause the difference of amplitude measurement although it was tested on the same specimen.*

**Keywords:** concrete, pulse velocity, density, ultrasonic pulse, transmission time.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>x</b>
<b>RINGKASAN.....</b>	<b>xii</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>xiv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Identifikasi Masalah .....	2
1.3 Rumusan Masalah .....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Tujuan.....	3
1.6 Manfaat.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Material Beton.....	5
2.2 Sifat-Sifat Beton .....	5
2.2.1 Kuat Tekan Beton.....	5
2.2.2 Hubungan Kuat Tekan dengan Kerapatan Beton .....	6
2.2.3 Modulus Elastis Statis .....	7
2.2.4 Modulus Elastis Dinamis .....	7
2.2.5 Rasio Poisson .....	7
2.2 Pengujian Kuat Tekan dengan Metode Rebound Hammer .....	8
2.3 Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) .....	8
2.3.1 Jenis-Jenis Gelombang Mekanik.....	9

2.3.2	Perambatan Gelombang .....	11
2.3.3	Metode Pengujian.....	12
2.3.4	Hubungan Cepat Rambat Gelombang dengan Kuat Tekan Beton.....	16
2.3.5	Prinsip Analisis Bentuk Gelombang (Waveform) .....	17
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>		<b>19</b>
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian .....	19
3.2	Bahan Penelitian.....	19
3.2.1	Pozzolan Portland Cement .....	19
3.2.2	Agregat .....	19
3.2.3	Air.....	19
3.3	Peralatan Penelitian .....	19
3.3.1	Saringan.....	20
3.3.2	Timbangan.....	20
3.3.3	Mesin Pengaduk Beton.....	20
3.3.4	Cetakan Benda Uji .....	20
3.3.5	Alat Uji Tekan .....	20
3.3.6	UPV Test .....	20
3.3.7	Alat Bantu Lainnya .....	20
3.4	Tahapan Penelitian .....	21
3.5	Rancangan Penelitian .....	22
3.6	Variabel Penelitian .....	22
3.7	Prosedur Penelitian.....	22
3.7.1	Pengujian Bahan Dasar .....	22
3.7.2	Pembuatan Benda Uji.....	23
3.7.3	Perawatan Benda Uji .....	23
3.7.4	Pengujian UPV .....	23
3.7.5	Pengujian Hammer .....	25

3.7.6	Pengujian Kuat Tekan .....	25
3.8	Metode Analisis.....	26
3.8.1	Pengumpulan Data .....	26
3.8.2	Pengolahan Data.....	28
3.8.3	Hipotesis.....	28
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>29</b>
4.1	Hasil Pengujian Bahan Penyusun Beton .....	29
4.1.1	Air.....	29
4.1.2	Semen.....	29
4.1.3	Agregat Kasar.....	29
4.1.4	Agregat Halus.....	29
4.2	Pembuatan Benda Uji.....	30
4.2.1	Perencanaan Campuran (Mix Design) Benda Uji .....	30
4.2.3	Hasil Pengujian Kuat Tekan Menggunakan Uji Tekan.....	31
4.2.4	Hasil Pengujian Kuat Tekan Menggunakan Uji Hammer.....	34
4.3	Hasil Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV).....	36
4.3.1	Pengukuran dengan Moda TT (Transmission Time) .....	38
4.3.2	Pengukuran dengan Moda PV (Pulse Velocity).....	39
4.3.3	Seleksi Data yang Menyimpang.....	41
4.4	Pengambilan Sampel Beton Acuan .....	49
4.5	Hubungan Antara Kuat Tekan Beton dengan Parameter Gelombang.....	51
<b>BAB V PENUTUP .....</b>		<b>59</b>
5.1	KESIMPULAN .....	59
5.2	SARAN .....	60
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>61</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>63</b>

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dewasa ini pembangunan dan kemajuan teknologi di Indonesia semakin meningkat, terutama di bidang material konstruksi pada infrastruktur. Beton merupakan material yang sering digunakan di bidang konstruksi. Beton menjadi komponen utama struktural yang mampu menahan dan mendistribusikan seluruh beban-beban dalam suatu bangunan. Material beton dipilih karena kuat tekannya yang sangat tinggi dibanding material lainnya termasuk baja. Dalam pelaksanaan di lapangan, kualitas beton harus selalu dikontrol melalui pengawasan agar dapat memenuhi spesifikasi yang disyaratkan dalam perencanaan. Kualitas pelaksanaan yang tidak memenuhi standar dapat menyebabkan kualitas beton yang dihasilkan tidak sesuai dengan yang disyaratkan. Sehingga dalam proses pelaksanaan perlu dilakukan pengujian untuk mengontrol kualitas dari beton tersebut.

Pada umumnya pengujian dilakukan melalui pengambilan beberapa sampel beton segar sebelum pengecoran untuk diuji di laboratorium. Sampel tersebut diambil dan disimpan hingga umur beton 28 hari, kemudian dilakukan pengujian tekan menggunakan mesin uji tekan (*compression test machine*). Salah satu kekurangan dari pengujian tekan di laboratorium adalah hasil pengujian yang kurang mewakili kualitas beton aktual pada struktur yang telah jadi. Perbedaan kualitas beton tersebut dapat terjadi karena adanya perbedaan dalam proses pengerjaan beton serta kondisi lingkungan di lapangan misalnya kelembaban, temperatur, dan faktor lainnya. Faktor-faktor tersebut tidak dapat diketahui hanya melalui uji laboratorium saja. Oleh karena itu diperlukan pengujian langsung (*in situ*) pada struktur bangunan di lapangan. Hasil yang akurat dapat diperoleh melalui pengambilan sampel inti dari beton struktural yang notabene akan merusak struktur bangunan (*destructive test*) yang ada dan memerlukan tindak lanjut berupa perbaikan.

Salah satu metode pengujian beton *in situ* tanpa merusak struktur atau yang disebut *non-destructive test (NDT)* adalah menggunakan kecepatan pulsa ultrasonik atau *ultrasonic pulse velocity (UPV)*. Alat yang digunakan dalam pengujian UPV disebut PUNDIT (*Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester*). Alat tersebut mampu mengetahui waktu transmisi serta cepat rambat gelombang ultrasonik yang melalui beton



dengan memperlihatkan bentuk gelombang (*waveform*) secara digital. Dari data waktu cepat rambat, dan amplitudo gelombang tersebut dapat ditunjukkan bagaimana kerapatan, homogenitas, serta ada tidaknya rongga di dalam beton. Dari penelitian-penelitian sebelumnya belum dibahas secara jelas mengenai bentuk dari gelombang dan interpretasinya terhadap kerapatan yang berujung pada kualitas beton.

## **1.2 Identifikasi Masalah**

Salah satu pengujian kualitas beton yang tak merusak (*non-destructive test*) adalah *UPV Test*. Dari pengujian tersebut didapatkan data berupa *waveform* yang berasal dari pancaran gelombang yang merambat melalui beton. Dari *waveform* tersebut perlu diinterpretasikan untuk menentukan kualitas dari beton tersebut. Sehingga perlu dilakukan penelitian mengenai karakteristik gelombang dari alat uji UPV untuk dapat mengetahui kualitas beton secara praktis terutama ketika di lapangan.

## **1.3 Rumusan Masalah**

Berdasarkan uraian yang telah disampaikan di atas, maka dalam penelitian ini didapat rumusan masalahnya adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hubungan cepat rambat, waktu transmisi, dan amplitudo gelombang dengan kuat tekan beton.
2. Bagaimana kualitas beton berdasarkan karakteristik gelombang ultrasonik pada alat uji *Ultrasonic Pulse Wave*.

## **1.4 Batasan Masalah**

1. Penelitian ini dikhususkan untuk beton tak bertulang, dengan menggunakan benda uji silinder dan kubus.
2. Variasi yang digunakan adalah variasi mutu beton normal yaitu 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa dan 35 MPa.
3. Sampel silinder yang diuji berjumlah 9 buah setiap variasi mutu beton.
4. Pada penelitian ini parameter kerapatan yang dianalisis adalah berdasarkan kuat tekan beton.
5. Pengujian yang dilakukan adalah uji UPV dan uji kuat tekan beton.

6. Penelitian hanya ditujukan untuk mendapatkan *waveform* dan kuat tekan beton.

## **1.5 Tujuan**

1. Memahami korelasi antara cepat rambat, waktu transmisi, dan amplitudo gelombang dengan kuat tekan beton.
2. Memahami hubungan antara kerapatan dan kuat tekan beton dengan parameter-parameter gelombang yang dihasilkan oleh alat *Ultrasonic Pulse Velocity*.

## **1.6 Manfaat**

Manfaat yang diharapkan dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Bagi penulis: dapat mengetahui model-model *waveform* sesuai dengan kerapatan dan mutu dari beton.
2. Bagi pembaca: dapat menjadi acuan untuk menentukan kualitas beton berdasarkan model gelombang (waktu transmisi dan amplitudonya).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Material Beton**

Beton adalah bahan bangunan yang diperoleh dari hasil pencampuran antara semen, air, agregat halus, agregat kasar, dengan perbandingan tertentu dan kadang-kadang ditambah bahan tambahan campuran (Suseno, 2010). Campuran semen dengan air disebut pasta semen yang berfungsi sebagai perekat, agregat halus berupa pasir sedangkan agregat kasar berupa kerikil atau batu pecah yang keduanya berfungsi sebagai pengisi. Beton merupakan bahan komposit, yaitu heterogen secara mikroskopis maupun makroskopis yang diperoleh dari bahan-bahan penyusunnya. Bila pembuatan beton dilakukan dengan baik maka setiap agregat akan terlapisi oleh pasta semen sehingga kualitas pasta akan sangat menentukan kualitas betonnya. Agregat biasanya menempati sekitar 60%-80% dari volume total beton, maka sifat-sifat agregat mempunyai pengaruh yang besar terhadap perilaku beton yang sudah mengeras (Nurlina, 2011).

#### **2.2 Sifat-Sifat Beton**

Beton segar dan beton keras memiliki sifat yang berbeda, di mana sifat beton segar berhubungan dengan konsistensi dan kemudahan pengerjaan, sedangkan sifat beton keras berhubungan dengan kekuatannya. Beberapa sifat-sifat dari beton keras antara lain:

##### **2.2.1 Kuat Tekan Beton**

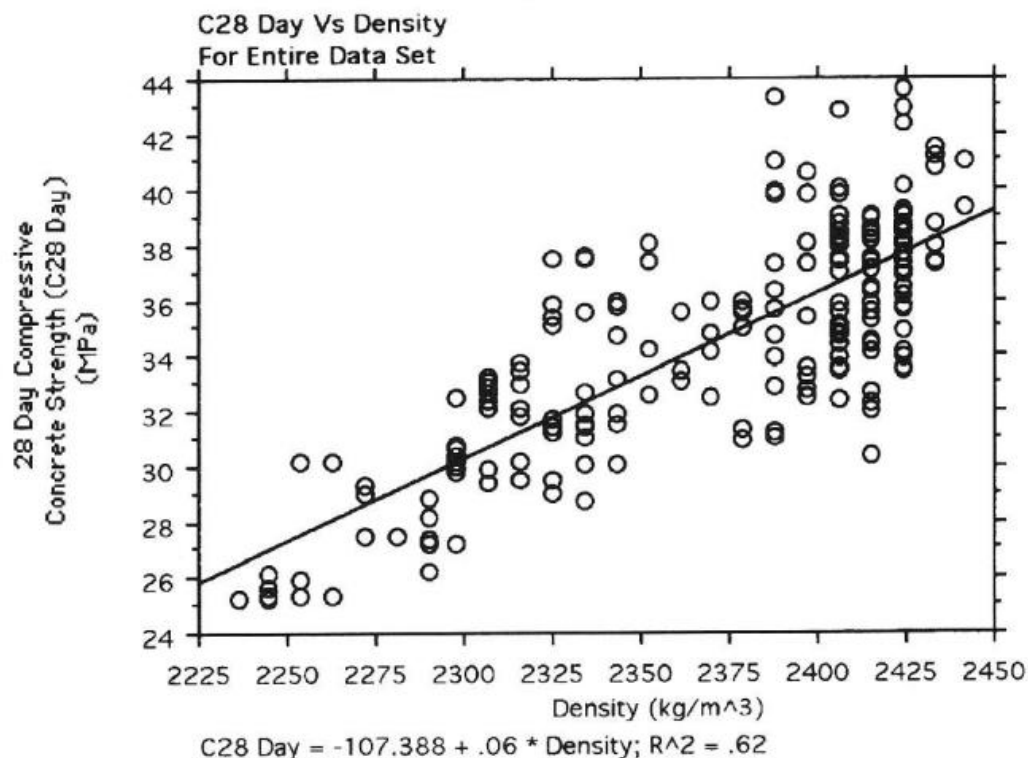
Beton mempunyai kuat tekan yang tinggi, tetapi kuat tariknya rendah dan bersifat getas. Kekuatan tekan ( $f'_c$ ) adalah kemampuan beton untuk menerima gaya tekan per-satuan luas. Kuat tekan beton adalah salah satu parameter yang digunakan untuk mengontrol mutu dari sebuah beton. Pengukuran kuat tekan beton dilakukan dengan uji tekan pada benda uji (sampel) berbentuk kubus dengan ukuran 150 x 150 x 150 mm atau silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Nilai kuat tekan beton ( $f'_c$ ) dinyatakan dalam MPa, dan dari beberapa pengujian didapatkan bahwa karena pengaruh bentuk maka kuat tekan beton dengan benda uji silinder menghasilkan kuat tekan sekitar 83% daripada dengan benda uji kubus. Kekuatan beton dipengaruhi oleh umur beton, kerapatan, kualitas bahan penyusun, serta proporsi campuran. Kuat tekan beton akan semakin bertambah seiring dengan

berkurangnya faktor air-semen atau nilai w/c (Mattacchione & Mattacchione, 1995). Variasi kuat tekan dapat disebabkan oleh metode pencampuran, pemindahan, dan pengecoran beton serta perbedaan dalam persiapan, curing, dan pengujian sampel benda uji.

### 2.2.2 Hubungan Kuat Tekan dengan Kerapatan Beton

Seperti telah diuraikan sebelumnya bahwa selain berdasarkan komposisi campurannya kuat tekan beton sangat dipengaruhi oleh kerapatan dari campuran material penyusunnya. Apabila gradasi dari agregat baik dan merata, rongga agregat akan terisi oleh agregat yang ukurannya lebih kecil, maka rongga atau *void* akan semakin kecil dan kerapatan semakin tinggi. Demikian pula dengan adanya pasta semen hasil reaksi dengan air yang dapat menjadi pengisi serta perekat dalam rongga antar butiran agregat.

Mattacchiano & Mattacchiano (1995) dalam penelitiannya telah mendapatkan hubungan antara kerapatan dengan kuat tekan dari sampel beton. Gambar 2.1 menunjukkan korelasi antara kerapatan (*density*) beton dalam  $\text{kg/m}^3$  dengan kuat tekan beton (*compressive concrete strength*) 28 hari dalam MPa yang cukup signifikan, yaitu dengan  $R^2 = 0,62$ .



Gambar 2.1 Korelasi Kuat Tekan 28 Hari dengan Kerapatan.

Sumber: Mattacchiano & Mattacchiano (1995,p.39)

### 2.2.3 Modulus Elastis Statis

Beton tidak memiliki modulus elastisitas yang pasti. Nilainya bervariasi tergantung dari kekuatan beton, umur beton, jenis pembebanan, dan karakteristik dan perbandingan semen dan agregat (McCormac, 2004). Berdasarkan peraturan ACI, modulus elastisitas beton dengan berat isi ( $w_c$ ) antara 1500-2500 kg/m<sup>3</sup> dapat dihitung menggunakan rumus:

$$E_c = w_c^{1,5} \cdot 0,043 \sqrt{f'_c} \dots \dots \dots (2-1)$$

Dengan:

$E_c$  = modulus elastisitas beton (MPa)

$w_c$  = berat isi beton (kg/m<sup>3</sup>)

$f'_c$  = kuat tekan beton (MPa)

Untuk beton normal dengan berat isi sekitar 2320 kg/m<sup>3</sup> adalah:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \dots \dots \dots (2-2)$$

### 2.2.4 Modulus Elastis Dinamis

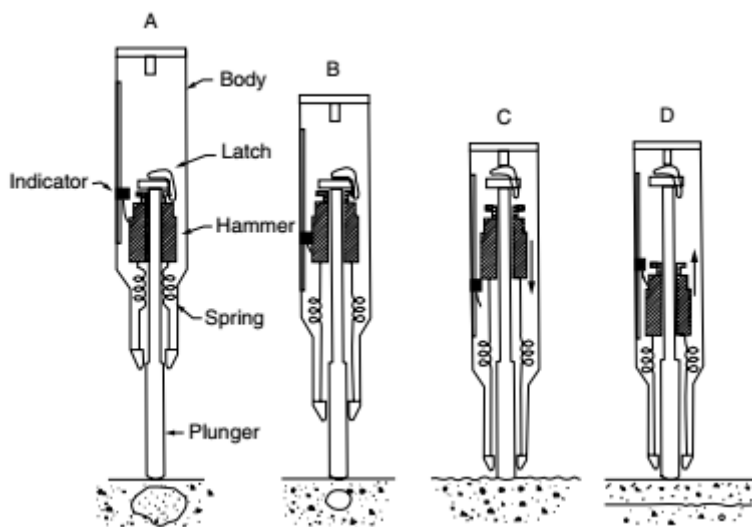
Modulus elastisitas dinamis yaitu modulus elastisitas yang berdasarkan regangan-regangan sesaat yang sangat kecil, biasanya diperoleh melalui uji sonik. Nilainya biasanya kira-kira sama dengan modulus nilai awal dan lebih besar 20%-40% dari nilai modulus elastisitas statis. Penggunaan modulus elastisitas dinamis ini biasanya pada analisis struktur dengan beban-beban dinamis seperti beban gempa atau beban tumbukan.

### 2.2.5 Rasio Poisson

Rasio Poisson (*Poisson's ratio*) adalah perbandingan ekspansi lateral dengan perpindahan longitudinal. Karena ketika sebuah beton menerima beban tekan, silinder tersebut tidak hanya mengalami perpindahan, tetapi juga mengalami ekspansi dalam arah lateral. Nilainya bervariasi mulai dari 0,11 untuk beton mutu tinggi dan 0,21 untuk beton mutu rendah, dengan nilai rata-rata 0,16. Hingga saat ini belum ditemukan adanya faktor-faktor yang memiliki hubungan langsung antara nilai rasio poisson ini, seperti perbandingan air-semen, ukuran agregat, lamanya perawatan, dan lainnya.

## 2.2 Pengujian Kuat Tekan dengan Metode *Rebound Hammer*

*Rebound hammer* merupakan metode yang dikembangkan oleh Ernst Schmidt (1948) untuk mengukur tingkat kekerasan pada beton menggunakan prinsip pantulan (*rebound*). Metode ini pada prinsipnya merupakan pengujian kekerasan permukaan dari beton untuk mendapatkan angka *rebound* yang digunakan untuk mengetahui kuat tekan dari beton menggunakan rumus empiris. Skema alat dan prinsip kerja uji hammer tampak pada gambar 2.2. Komponen utama penyusunnya terdiri dari badan hammer, *plunger* pemberat hammer, dan pegas. Bagian lain termasuk pengait atau *latch* yang akan mengunci pemberat ke ujung batang *plunger* yang ketika alat hammer ditekan hingga maksimal, *latch* akan otomatis terlepas sehingga pemberat akan meluncur dan kemudian memantul pada ujung *plunger*. Jarak pantulan inilah yang diukur menjadi angka *rebound*. Angka tersebut kemudian dikonversi menjadi kuat tekan yang juga dipengaruhi oleh gravitasi akibat kemiringan penggunaan alat hammer. Pengujian hammer mengandalkan kekerasan dari permukaan, sehingga untuk mendapatkan hasil yang relevan, permukaan yang diuji harus halus dan rata.



Gambar 2.2. Bagian-bagian dan prinsip kerja alat uji hammer.

Sumber: V.M Malhotra & N.J Carino (2004)

## 2.3 Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*

Metode kecepatan pulsa ultrasonik atau UPV telah berhasil digunakan untuk mengevaluasi kualitas dari beton selama lebih dari 60 tahun. Metode ini dapat digunakan untuk mendeteksi retak internal dan cacat lainnya termasuk perubahan dari beton seperti penurunan kualitas beton akibat lingkungan kimia yang agresif atau pembekuan dan pencairan (V.M Malhotra & N.J Carino, 2004).

Dengan menggunakan metode kecepatan pulsa juga dapat memperkirakan kekuatan dari benda uji beton maupun beton di lapangan. Metode ini termasuk *non-destructive test*, karena menggunakan gelombang mekanik yang tidak menimbulkan kerusakan pada elemen beton yang diuji.

### 2.3.1 Jenis-Jenis Gelombang Mekanik

Gelombang mekanik merupakan gelombang merambat melalui medium (Halliday, Resnick & Walker, 1996). Medium yang dilalui dapat berupa benda padat, cair, maupun gas. Berdasarkan arah getarnya, gelombang mekanik dibagi menjadi dua yaitu gelombang longitudinal dan gelombang transversal. Gelombang longitudinal yaitu gelombang dengan arah getar sejajar dengan arah rambatnya, sedangkan pada gelombang transversal arah getarnya tegak lurus arah rambatnya. Menurut frekuensinya, gelombang mekanik longitudinal dibedakan menjadi gelombang infrasonik, gelombang audiosonik, dan gelombang ultrasonik seperti pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 *Jenis gelombang mekanik longitudinal berdasarkan frekuensi*

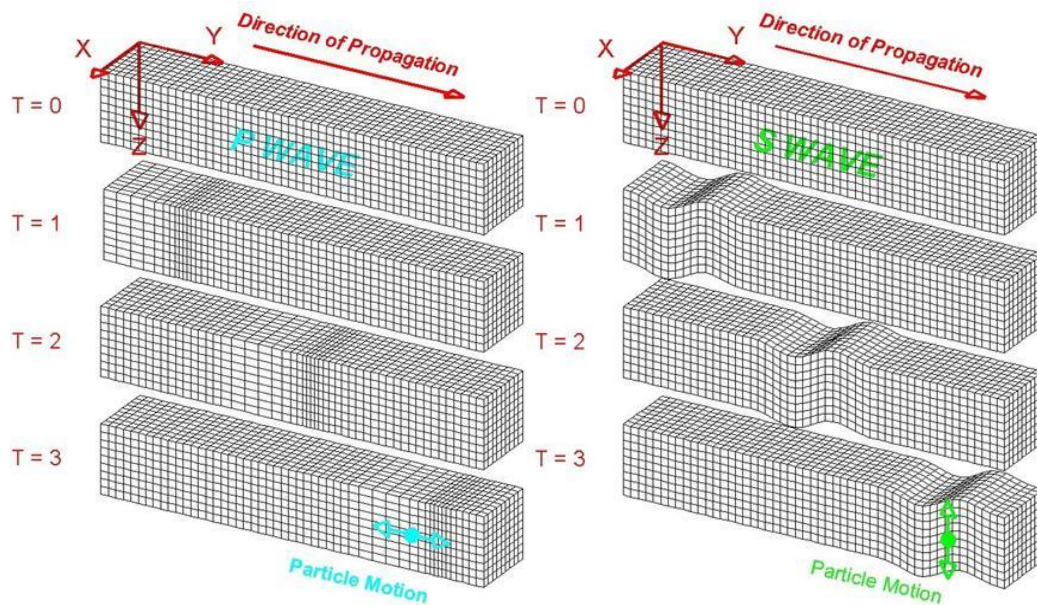
Jenis Gelombang	Frekuensi	Keterangan
Infrasonik	< 20 Hz	Didengar jangkrik dan anjing
Audiosonik	20 – 20.000 Hz	Didengar manusia
Ultrasonik	> 20.000 Hz	Didengar kelelawar

Gelombang mekanik menyalurkan energi pada partikel dalam medium rambatnya, sehingga dalam perambatannya terjadi pergerakan dan interaksi antar partikel. Tiga jenis gelombang mekanis akan timbul ketika suatu permukaan dari media padat elastis yang besar diberikan beban dinamis maupun getaran, yaitu:

1. Gelombang kompresi atau longitudinal (*compressional waves* atau *P-waves*)

*P-waves* juga disebut gelombang kompresi karena memberikan tegangan tekan dan tarik (sejajar arah rambatnya) pada medium rambatnya. Pada gelombang ini partikel berosilasi maju dan mundur dari titik ekuilibriumnya. Gelombang ini mampu merambat melalui segala jenis medium baik padat, cair, maupun gas. *P-waves* memiliki kecepatan rambat yang paling cepat, tetapi amplitudonya paling kecil di antara gelombang-gelombang lainnya.





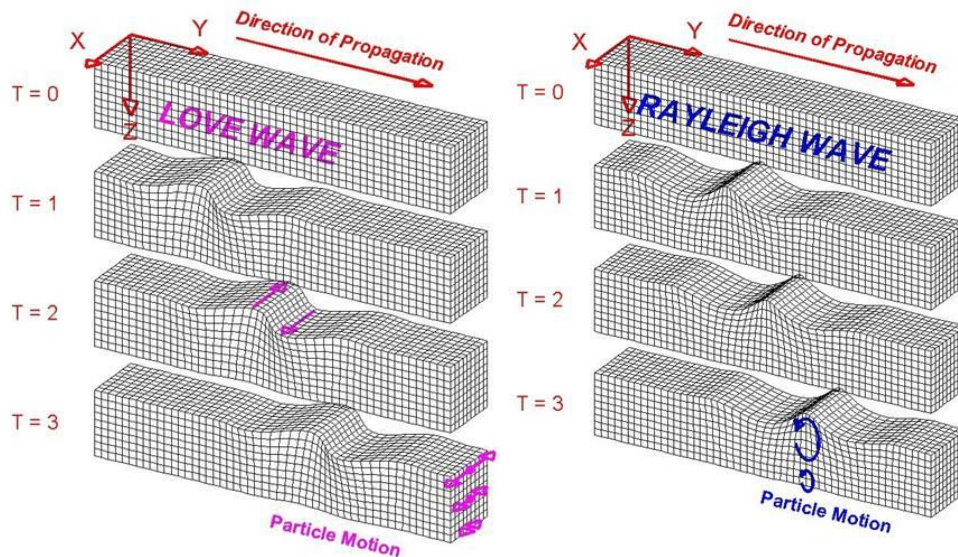
Gambar 2.3 Pergerakan partikel pada gelombang *P-waves* (kiri) dan *S-waves* (kanan).

## 2. Gelombang geser atau transversal (*shear waves* atau *S-waves*)

*S-waves* menimbulkan tegangan geser pada partikel dalam medium rambatnya. Pada gelombang ini partikelnya berosilasi secara tegak lurus dengan arah rambatan (transversal). Karena merambat melalui medium ruang, gelombang ini juga dibagi menjadi gerak horizontal (SH) dan gerak vertikal (SV).

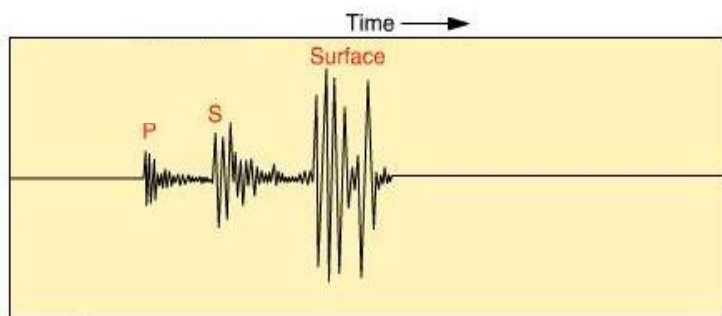
## 3. Gelombang permukaan (*surface waves*)

Gelombang permukaan merupakan gelombang yang merambat melalui permukaan dan semakin mengecil apabila semakin menjauhi permukaan. Gelombang permukaan merambat lebih lambat dan frekuensinya lebih rendah dari gelombang badan (*P-waves* dan *S-waves*), tetapi memiliki amplitudo yang lebih besar. Gelombang permukaan dibagi menjadi 2 yaitu *Love waves* dan *Rayleigh waves*. *Love waves* merupakan gelombang yang arah gerak partikelnya tegak lurus arah rambatnya (transversal), tetapi terjadi di permukaan. Sedangkan *Rayleigh waves* memiliki gerakan partikel yang *eliptik retrograde*, yaitu bergerak menggulung medium yang dilalui dan terlihat seperti gerakan gelombang air di laut.



Gambar 2.4 Pergerakan partikel pada gelombang permukaan: *Love-waves* (kiri) dan *Rayleigh-waves* (kanan).

### 2.3.2 Perambatan Gelombang



Gambar 2.5 Jenis-jenis gelombang pada alat pembaca gelombang.

Masing-masing jenis gelombang memiliki karakteristik cepat rambat yang berbeda-beda. Pada benda padat, *P-waves* merambat paling cepat sedangkan gelombang permukaan yang paling lambat, seperti pada gambar 2.5. Pada beton, menurut ASTM kecepatan rambat *S-waves* dan permukaan berturut-turut adalah 60 dan 55% dari kecepatan rambat *P-waves*. Kecepatan rambat gelombang bergantung pada sifat elastis dan kerapatan dari mediumnya. Untuk medium padat elastis yang homogen, kecepatan rambat *P-waves* adalah:

$$V = \sqrt{\frac{KE}{\rho}} \dots \dots \dots (2-3)$$

Dengan:

V = kecepatan rambat,

$$K = \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$$

E = modulus elastis dinamis

$\rho$  = kerapatan

$\mu$  = rasio Poisson dinamis

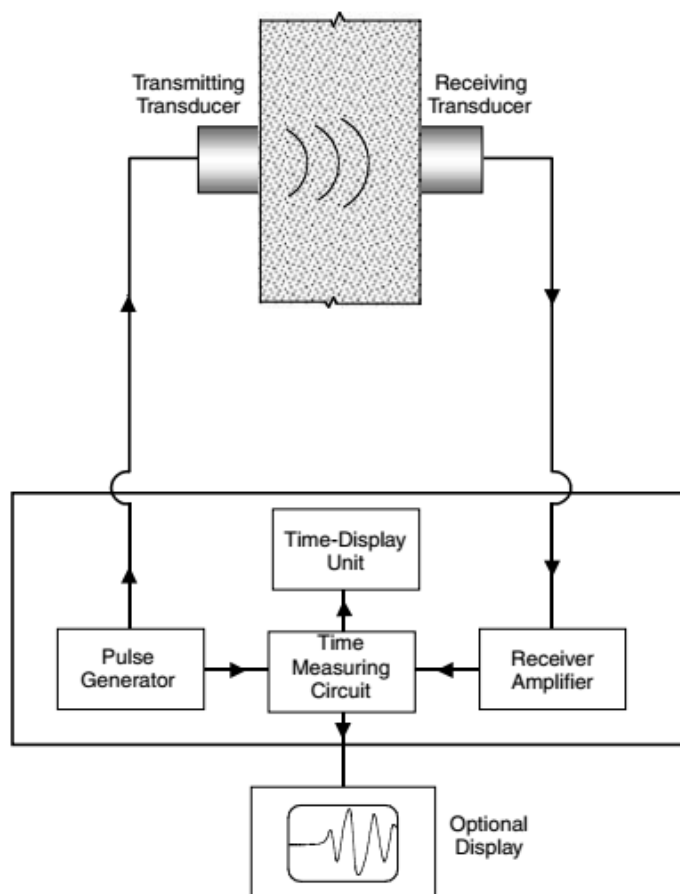
Rentang variasi dari nilai K sangat kecil, yaitu antara 1,06-1,20. Tetapi, variasi nilai E dan  $\rho$  berpengaruh signifikan terhadap V. Umumnya kecepatan rambat (V) pada beton yaitu antara 3000 hingga 5000 m/s.

Ketika rambatan gelombang menemui bagian yang memiliki sifat material yang berbeda, sebagian energi dari gelombang tersebut akan tersebar dari lintasan awal gelombang. Misalnya dengan adanya rongga, retak, maupun partikel agregat dalam beton akan menyebarkan sebagian energi gelombang kompresi dari lintasan awal gelombang tersebut. Tingkat penyebaran akan meningkat ketika panjang gelombang yang merambat besarnya lebih kecil atau sama dengan ukuran bagian penyebarannya, yang menimbulkan terjadinya gelombang tersebut mengalami redaman lebih cepat. Pada beton, batas maksimal dari frekuensi yang digunakan adalah 500 kHz sebagaimana terkait dengan panjang gelombang sekitar 10 mm, yang berada dalam rentang ukuran agregat kasar.

### 2.3.3 Metode Pengujian

Seperti pada gambar 2.6, alat pengujian UPV terdiri dari beberapa komponen utama yaitu:

- a. Generator gelombang (*pulse generator*) yang berisi sirkuit untuk menghasilkan gelombang listrik yang akan dikirimkan oleh transmitter,
- b. Sepasang transduser, yaitu transduser pengirim (*transmitting transducer*) yang mengubah gelombang listrik menjadi gelombang ultrasonik dan kemudian merambatkannya, serta transduser penerima (*receiving transducer*) yang menerima gelombang dari transmitter, dan
- c. Pengukur waktu (*time measuring circuit*), yang berfungsi mencatat waktu transmisi gelombang yang melalui beton.
- d. Osiloskop, yaitu berupa layar tambahan untuk memantau perilaku osilasi gelombang yang diterima oleh *receiver*.

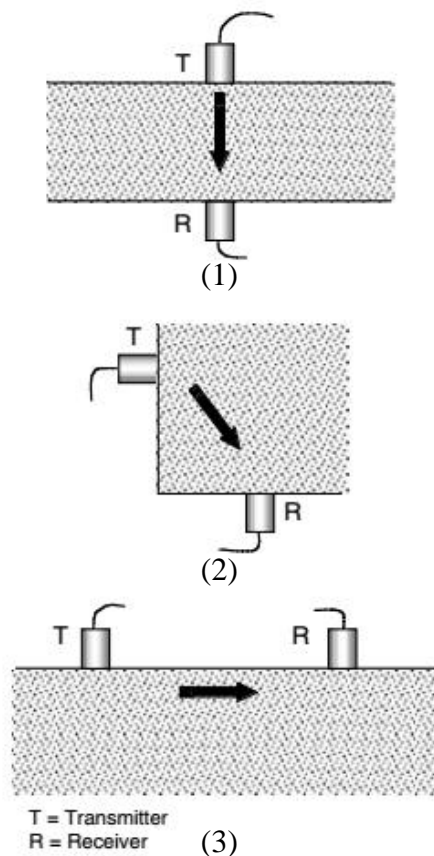


Gambar 2.6 Diagram skematik dari instrumen UPV

Sumber: V.M Malhotra & N.J Carino (2004)

Dalam pelaksanaan di lapangan, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan, diantaranya adalah metode/konfigurasi pengukuran. Ada pun metode-metode yang dapat dilakukan dengan menggunakan UPV seperti pada gambar 2.7 antara lain:

- a. *Direct transmission*, yaitu *transmitter* dan *receiver* diletakkan saling berhadapan, sehingga lintasan gelombang tegak lurus dengan permukaan transduser. Panjang lintasan didapat dengan mengukur jarak antar transduser yakni jarak antara 2 sisi beton yang diuji. Metode ini memberikan hasil paling memuaskan karena transmisi energi gelombang yang diperoleh adalah yang paling besar dibanding metode lainnya.
- b. *Semi-direct transmission* (semi langsung), yaitu kedua transduser dipasang pada dua sisi yang berbeda dan tidak saling berhadapan. Panjang lintasan didapat dengan mengukur jarak miring dari kedua transduser. Metode ini cukup memberikan hasil yang memuaskan dengan ketentuan jarak antara *transmitter* dan *receiver* tidak terlalu jauh.



Gambar 2.7 Konfigurasi pengujian UPV. (1) *Direct method*, (2) *semi-direct method*, dan (3) *indirect method*.

Sumber: V.M Malhotra & N.J Carino, (2004)

- c. *Indirect* atau *surface transmission* (tidak langsung), yaitu pemasangan *transmitter* dan *receiver* pada sisi beton yang sama. Pada metode ini jarak antara kedua transduser perlu ditentukan terlebih dahulu seperti yang dikehendaki. Umumnya metode ini dipakai ketika hanya salah satu sisi beton yang dapat diakses. Namun menurut Yaman (2001), hasil yang diperoleh metode ini secara statistik mirip dengan hasil pengujian dengan metode *direct*.

Cara kerja alat UPV adalah dengan memberi getaran gelombang longitudinal lewat transduser elektro – akustik, melalui cairan perantara (*couplant*) yang berwujud gel atau sejenis pasta, yang dioleskan pada permukaan beton sebelum tes dimulai. Cairan tersebut berfungsi agar antara permukaan beton dengan transduser tidak terdapat rongga, sehingga gelombang dapat merambat dengan sempurna. Saat gelombang merambat melalui media yang berbeda, yaitu *couplant* dan beton, pada batas *couplant* dan beton akan terjadi pantulan gelombang yang merambat dalam bentuk gelombang longitudinal dan geser. Gelombang geser merambat tegak lurus lintasan, dan gelombang longitudinal merambat sejajar lintasan.

Yang pertama kali mencapai transduser penerima adalah gelombang longitudinal, kemudian gelombang ini diubah menjadi sinyal gelombang elektronik yang dapat dideteksi oleh transduser penerima, sehingga waktu tempuh gelombang dapat diukur. Waktu tempuh (T) yang dibutuhkan gelombang untuk merambat pada beton sepanjang lintasan (L) dapat diukur, sehingga cepat rambat gelombang dapat dicari dengan rumus:

$$V = L / T \dots\dots\dots(2-4)$$

Dengan:

V = Kecepatan gelombang longitudinal (m/detik)

L = Panjang lintasan beton yang dilewati (m)

T = Waktu tempuh gelombang longitudinal ultrasonik (detik)

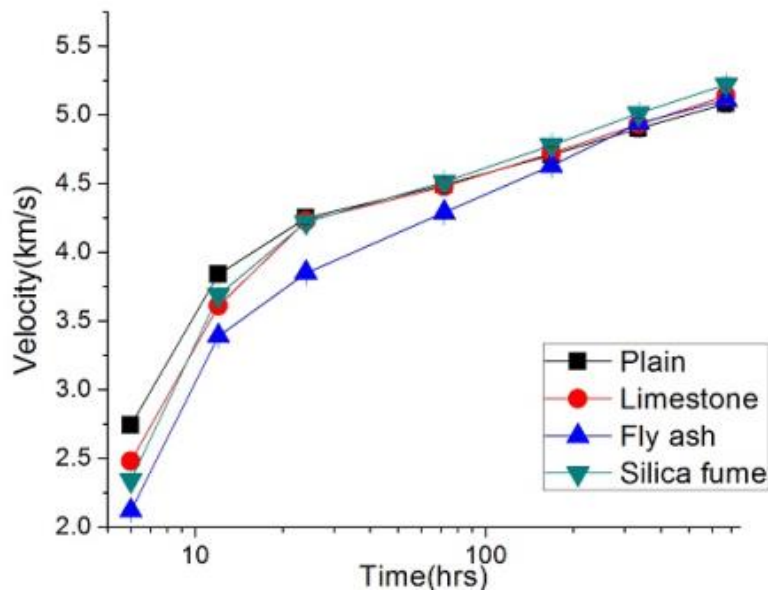
Dari hasil perhitungan kecepatan rambat, secara praktis dapat ditentukan kualitas dari beton tersebut seperti pada tabel 2.2. Hasil perhitungan kecepatan gelombang longitudinal tersebut juga dapat digunakan untuk menginterpretasikan kualitas dari beton, antara lain:

- a. Homogenitas beton
- b. Mendeteksi keretakan
- c. Menentukan modulus elastis dinamis dan rasio poisson dinamis
- d. Mendeteksi rongga
- e. Memperkirakan modulus elastisitas beton
- f. Memperkirakan kuat tekan beton

Tabel 2.2 *Kualifikasi kualitas beton berdasarkan cepat rambat gelombang*

Cepat Rambat gelombang longitudinal		Kualitas
km/detik	ft/detik	
> 4,5	> 15	Sangat Baik
3,5 - 4,5	12 - 15	Baik
3,0 - 3,5	10 - 12	Diragukan
2,0 - 3,0	7 - 10	Jelek
< 2,0	< 7	Sangat Jelek

(Sumber: *International Atomic Energy Agency*, 2002)



Gambar 2.8 Perubahan cepat rambat pada beton *plain* dan beton dengan *admixture* terhadap umur beton.

Sumber: B. Sanish & Santhanam (2012)

### 2.3.4 Hubungan Cepat Rambat Gelombang dengan Kuat Tekan Beton

Fungsi utama dari uji UPV yaitu untuk mengetahui kualitas beton berdasarkan cepat rambat gelombang yang dipengaruhi oleh kerapatan beton. Hasil uji UPV tidak memiliki hubungan dengan kuat tekan dari beton secara langsung, tetapi karena kerapatan berbanding lurus dengan kuat tekan maka dapat dicari suatu korelasi antara cepat rambat gelombang dengan kuat tekan beton. B. Sanish & Santhanam (2012) telah meneliti cepat rambat gelombang pada sampel beton dengan umur berbeda-beda hingga umur 28 hari dengan hasil seperti pada gambar 2.8. Dari penelitian tersebut dapat dibuktikan bahwa pertambahan cepat rambat terhadap umur beton lebih tinggi pada umur awal beton, dan grafik akan semakin landai pada umur akhir beton, seperti grafik hubungan kuat tekan dengan umur beton.

Tabel 2.3 Hubungan kuat tekan beton dan UPV

Persamaan	R <sup>2</sup>	Sumber
$S = 1.146\exp(0.77V_p)$	0,8	Turgut (2004)
$S = 1.19\exp(0.715V_p)$	0,59	Nashn't et al. (2005)
$S = 8.4 * 10^{-9}(V_p * 10^3)^{2.5921}$	0,42	Kheder (1999)A
$S = 1.2 * 10^{-5}(V_p * 10^3)^{1.7447}$	0,41	Kheder (1999)B
$S = \exp[(-3.3 \pm 1.8) + (0.0014 \pm 0.0004) (V_p * 10^3)]$	0,48	Rio et al. (2004)

(Sumber: Trtnik et al 2007)



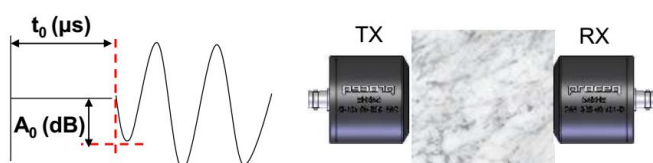
Selain itu dalam studinya, Trtnik et al (2007) telah mengumpulkan beberapa rumus hubungan antara kuat tekan beton,  $S$  (MPa) dengan UPV,  $V_p$  (km/s) dari beberapa percobaan terdahulu seperti pada tabel 2.3. Evaluasi dari kuat tekan beton biasanya didasarkan pada hubungan empiris terhadap uji *non-destructive* tersebut.

### 2.3.5 Prinsip Analisis Bentuk Gelombang (Waveform)

Dari gelombang yang didapatkan dari pengujian UPV, dapat dilanjutkan dengan proses analisis gelombang. Prinsip analisis yang direkomendasikan oleh PROCEQ (2014) adalah membandingkan bentuk gelombang dari pengujian beton eksisting dengan beton yang menjadi acuan dengan mutu yang dapat diterima. Pengujian awal dilakukan pada sampel beton yang mutunya telah diketahui sebelumnya. Parameter yang diambil dari pengujian ini adalah waktu transmisi ( $t_0$ ) dan tingkat penerimaan dari receiver berdasarkan amplitudo dari puncak pertama gelombang yang diterima ( $A_0$ ).

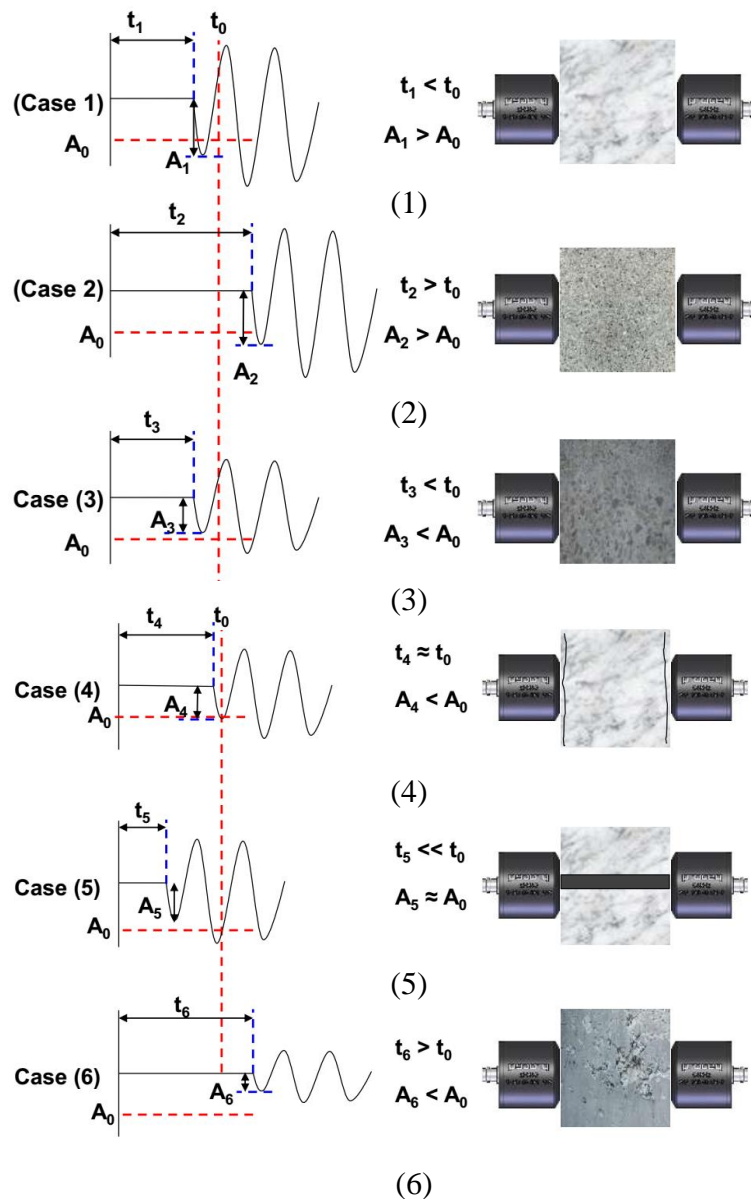
Kemudian dilanjutkan dengan pengujian pada bagian struktur yang ingin diketahui mutunya untuk mendapatkan dua parameter di atas pada beton eksisting seperti pada gambar 2.9. Parameter tersebut dibandingkan dengan nilai hasil pengujian pada beton acuan. Sehingga dapat diperoleh kesimpulan mengenai mutu beton eksisting yang diuji tersebut. Beberapa interpretasi dari hasil pengujian dapat dilihat pada gambar 2.10.

Homogenitas dan kerapatan dari beton dapat dilihat dari hasil pembacaan waktu transmisi. Gelombang lebih cepat merambat melalui bagian yang memiliki kerapatan tinggi, seperti beton dengan jumlah agregat kasar (kerikil) banyak atau beton bertulang. Sedangkan amplitudo menunjukkan tingkat kehilangan energi dari gelombang yang diterima oleh *receiver* yang dipengaruhi oleh perubahan ukuran dan kerapatan partikel yang dilalui. Pada beton yang tersusun dari butiran yang relatif seragam (misalnya beton dengan jumlah pasir yang tinggi) kehilangan energi cenderung lebih rendah sehingga amplitudo yang terbaca lebih tinggi.



Gambar 2.9 Bentuk gelombang dari beton acuan yang telah diketahui mutunya.





Gambar 2.10 Perbandingan parameter beton yang diuji dengan beton acuan. (1) Beton dengan kualitas baik dan kekuatan tinggi, (2) jumlah pasir yang tinggi dan kerikil rendah, (3) jumlah kerikil tinggi dan pasir rendah, (4) retak permukaan atau pemberian *couplant* yang buruk, (5) pengujian melalui tulangan, dan (6) terjadi retak, *honeycomb*, atau rongga.

(Sumber: PROCEQ, 2014)

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Tempat dan Waktu Penelitian**

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang dimulai pada bulan Februari 2017 sampai selesai.

#### **3.2 Bahan Penelitian**

Dalam penelitian ini digunakan beberapa bahan untuk mencapai tujuan penelitian, meliputi:

##### **3.2.1 *Pozzolan Portland Cement***

*Pozzolan Portland Cement* yang digunakan pada penelitian ini adalah semen merk Semen Gresik kemasan 40 kg. Sebelum penelitian, kemasan dipastikan dalam kondisi baik dan tersegel, serta tidak terjadi penggumpalan pada semen di dalamnya.

##### **3.2.2 Agregat**

Agregat yang digunakan dalam penelitian ini adalah agregat kasar (kerikil) dan agregat halus (pasir). Agregat diperoleh dari daerah Malang dengan melalui tahap pengujian sebelum digunakan sebagai benda uji. Tahap pengujian meliputi gradasi, kadar air, dan berat jenis.

##### **3.2.3 Air**

Air yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.

#### **3.3 Peralatan Penelitian**

Beberapa peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi alat untuk mempersiapkan material hingga proses pengujian benda uji pada akhirnya. Peralatan yang digunakan berada di Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.

### **3.3.1 Saringan**

Penelitian ini menggunakan saringan No. 1,5” hingga No. 4 untuk menentukan gradasi agregat kasar (kerikil) serta saringan No. 4 hingga No. 200 untuk gradasi agregat halus (pasir).

### **3.3.2 Timbangan**

Timbangan digunakan untuk mengukur berat bahan penyusun beton serta benda uji silinder dan kubus. Timbangan yang digunakan adalah timbangan dengan kapasitas 200 kg dengan ketelitian 10 gram dan timbangan dengan kapasitas 5 kg dengan ketelitian 0,1 gram.

### **3.3.3 Mesin Pengaduk Beton**

Mesin ini digunakan untuk mengaduk campuran bahan-bahan beton hingga menjadi campuran yang homogen.

### **3.3.4 Cetakan Benda Uji**

Penelitian ini menggunakan cetakan/bekisting untuk benda uji silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm serta cetakan untuk benda uji kubus dengan ukuran 15 x 15 x 15 cm. Cetakan terbuat dari baja yang dapat dibongkar pasang.

### **3.3.5 Alat Uji Tekan**

Alat uji tekan digunakan untuk mengetahui kuat tekan dari benda uji beton sesungguhnya. Alat uji dalam penelitian ini adalah *Compression Test Machine*.

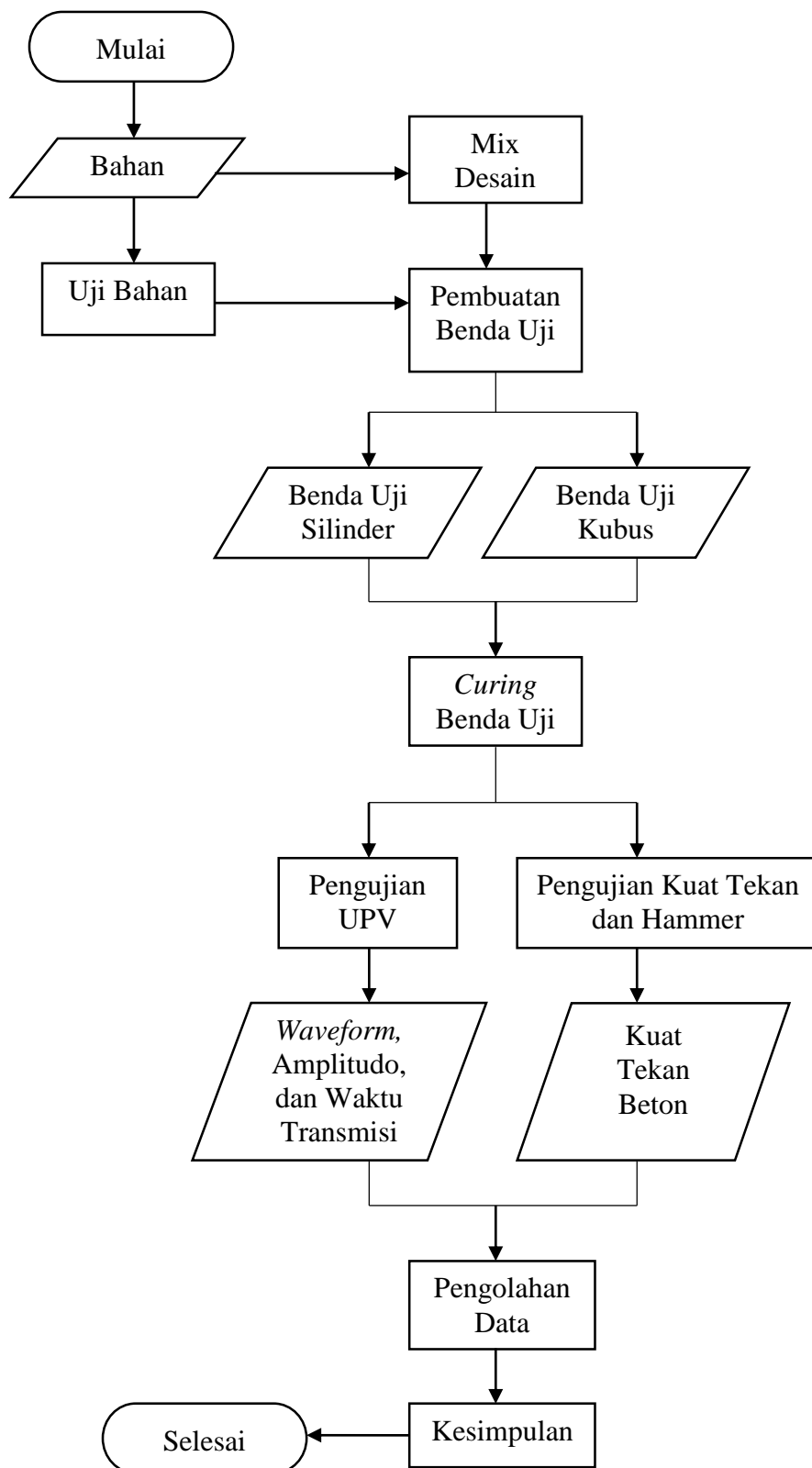
### **3.3.6 UPV Test**

Penelitian ini menggunakan alat UPV dengan merk Proceq tipe PL-200PE. Alat UPV ini berfungsi untuk mengetahui waktu transmisi dan cepat rambat gelombang ultrasonik melalui benda uji beton.

### **3.3.7 Alat Bantu Lainnya**

Alat bantu lainnya antara lain ember, alat pengaduk, karung goni, serta bak air untuk proses perawatan benda uji.

### 3.4 Tahapan Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir tahapan penelitian

### 3.5 Rancangan Penelitian

Dalam penelitian ini dibuat dua jenis benda uji yaitu benda uji silinder sebagai benda uji utama dan benda uji kubus sebagai kontrol kuat tekan. Benda uji silinder memiliki diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, sedangkan benda uji kubus berukuran 15 x 15 x 15 cm. Masing masing benda jenis benda uji diberikan variasi pada mutu kuat tekan betonnya. Benda uji ini digunakan untuk pengujian tekan serta pengujian UPV. Jumlah benda uji silinder adalah 36 buah dengan jumlah tiap variasi adalah 9 buah, serta benda uji kubus dengan jumlah total 10 buah. Rincian benda uji terdapat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 *Rancangan penelitian beton*

Benda Uji	Variasi Kuat Tekan Rencana Beton			
	20 MPa	25 MPa	30 MPa	35 MPa
Silinder	9	9	9	9
Kubus	1	3	3	3

### 3.6 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang akan diukur adalah sebagai berikut:

- Variabel bebas (*independent variable*), yaitu variabel yang bebas ditentukan oleh peneliti. Dalam penelitian ini, yang menjadi variabel bebas adalah variasi kuat tekan rencana dalam perencanaan campuran beton (*mix design*) dari benda uji.
- Variabel terikat, yaitu variabel yang nilainya tergantung dari variabel bebas. Variabel terikat dari penelitian ini adalah kuat tekan beton aktual dan *waveform* dari hasil pengujian UPV, meliputi waktu transmisi serta amplitudo gelombang.

### 3.7 Prosedur Penelitian

#### 3.7.1 Pengujian Bahan Dasar

Pengujian bahan dasar yang akan digunakan mengacu pada buku petunjuk praktikum teknologi beton dari Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Bahan dasar yang diuji adalah agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil). Unsur-unsur dalam pengujian karakteristik agregat halus dan kasar meliputi: analisis butiran, pengujian berat jenis penyerapan, dan kadar air.

### 3.7.2 Pembuatan Benda Uji

Langkah-langkah pembuatan benda uji adalah sebagai berikut:

1. Bahan penyusun beton disiapkan dengan kuantitas sesuai mix desain.
2. Bahan-bahan tersebut dimasukkan ke dalam alat pengaduk kemudian diaduk selama kurang lebih 15 menit hingga campuran menjadi homogen.
3. Setelah pengadukan, diambil sebagian adonan beton untuk dilakukan pengujian *slump*.
4. Cetakan disiapkan dengan memberikan lapisan tipis dari oli.
5. Campuran beton dituang ke dalam cetakan silinder dan kubus.

### 3.7.3 Perawatan Benda Uji

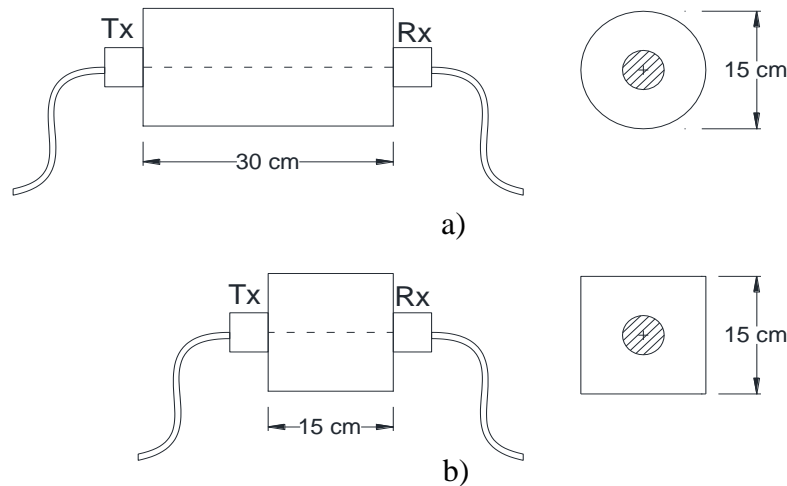
Setelah 24 jam cetakan benda uji silinder dan kubus dibuka dan dilakukan perawatan dengan tujuan agar semen terhidrasi dengan sempurna. Perawatan benda uji meliputi dua cara antara lain:

1. Benda uji direndam dalam bak berisi air dengan suhu  $23^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C}$ .
2. Benda uji diselimuti dengan karung goni basah dan tiap hari dibasahi terus menerus dengan air.

Waktu perawatan benda uji disamakan setiap variasi benda uji sesuai dengan waktu pengecorannya. Pada penelitian ini perawatan beton dihentikan dua minggu (14 hari) setelah tanggal pengecoran.

### 3.7.4 Pengujian UPV

Pada penelitian ini pengujian UPV dilakukan dengan menggunakan alat Pundit PL-200. Pengujian dilakukan pada benda uji beton yang telah berumur 28 hari. Pengambilan data dilakukan dengan metode *direct* yaitu dengan menempatkan *transducer* pada titik tengah permukaan atas dan bawah dari benda uji silinder dan kubus seperti terlihat pada gambar 3.2. Pada penelitian menggunakan *transducer* standar dengan frekuensi 54 kHz. Hasil yang didapatkan dari pengujian UPV berupa cepat rambat, waktu transmisi, amplitudo, serta *waveform* atau bentuk dari gelombang yang diterima oleh *receiver transducer*.



Gambar 3.2 Skema titik pengujian UPV pada benda uji: (a) silinder dan (b) kubus.

Beberapa hal yang dilakukan dalam prosedur pengujian UPV antara lain:

1. Meratakan dan membersihkan permukaan beton.
2. Pada penelitian ini digunakan transduser standar dengan frekuensi 54 kHz.
3. Mengkalibrasi alat uji UPV dengan tujuan agar pembacaan waktu tempuh pada *transmitter* dan *receiver* sama, seperti ditunjukkan pada gambar 3.3. Kedua transduser ditempatkan pada kedua sisi *calibration rod* yang telah disediakan.
4. Menentukan jarak *transmitter* dan *receiver* pada layar Pundit PL-200.
5. Memberikan gel (*couplant*) pada permukaan kontak *transmitter* dan *receiver* setiap sebelum pengujian dimulai.
6. Pengujian dilakukan pada titik yang telah ditentukan sebelumnya
7. Pengujian UPV telah selesai dan didapatkan hasil berupa bentuk gelombang ultrasonik beserta waktu transmisi dan cepat rambatnya.



Gambar 3.3 Proses kalibrasi awal alat uji UPV.

### 3.7.5 Pengujian Hammer

Sebelum dilakukan pengujian kuat tekan aktual menggunakan uji tekan, benda uji terlebih dahulu dilakukan uji hammer untuk memperkirakan kuat tekannya. Pengujian hammer dilakukan menggunakan alat uji yang menggunakan prinsip *rebound hammer* atau pantulan untuk mendapatkan tingkat kekerasan permukaan beton yang diuji. Alat yang digunakan adalah *Schmidt Hammer* dari PROCEQ. Prosedur pengujian hammer adalah sebagai berikut:

1. Sebelum dilakukan pengujian, permukaan benda uji terlebih dahulu diratakan dan dibersihkan menggunakan batu gerinda.
2. Menentukan titik pengujian, di mana pada penelitian ini setiap benda uji terdapat 9 hingga 10 titik yang diuji hammer.
3. Mempersiapkan alat *rebound hammer*.
4. Dalam pengujian, *rebound hammer* ditekan pada permukaan yang keras hingga batang pemukul terlepas dari posisi terkunci, dan keluar dari badan *hammer*.
5. Pengujian dilakukan dengan arah vertikal ke bawah.
6. Pengujian minimal dibutuhkan 9 pemukulan yang dihitung dari median, serta data pengujian tidak valid jika nilai yang berbeda (data yang melebihi atau kurang dari rentang deviasi standar) melebihi 20%.
7. Nilai rata-rata *rebound* akan langsung terkonversi menjadi kuat tekan karakteristik pada layar indikator.

### 3.7.6 Pengujian Kuat Tekan

Setelah mendapat data-data dari pengujian UPV dan hammer, kemudian dilakukan pengujian kuat tekan. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai kuat tekan dari benda uji beton yang telah berumur 28 hari. Prosedur yang dilakukan dalam pengujian kuat tekan adalah sebagai berikut:

1. Sebelum dilakukan pengujian, benda uji terlebih dahulu ditimbang untuk mendapatkan berat benda uji dan kerapatan beton sebagai data tambahan.
2. Pada permukaan atas benda uji dilapisi (*caping*) dengan mortar belerang dengan tujuan agar tegangan yang diberikan mesin penguji dapat terdistribusi secara merata pada permukaan beton.





*Gambar 3.4* Alat pengujian kuat tekan beton.

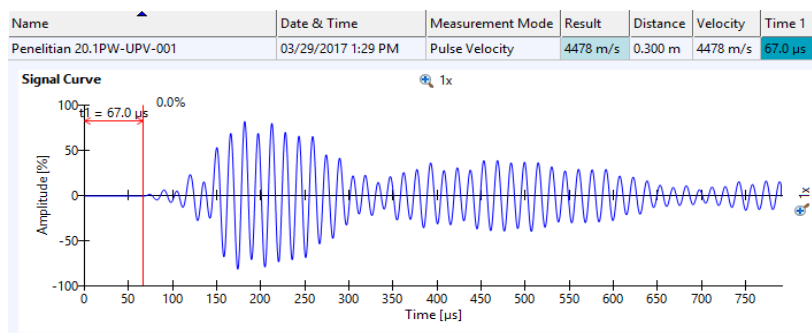
Sumber: Dokumentasi penelitian.

3. Benda uji diletakkan pada mesin uji secara sentris.
4. Mesin uji tekan dijalankan dengan penambahan beban secara konstan hingga benda uji hancur.
5. Beban saat beton hancur dicatat untuk mendapatkan beban maksimum yang dapat diterima beton.

### **3.8 Metode Analisis**

#### **3.8.1 Pengumpulan Data**

Dari pengujian-pengujian yang telah dilakukan diambil beberapa data-data yang diperlukan. Pengujian kuat tekan menghasilkan data-data beban maksimum yang kemudian dikonversikan menjadi kuat tekan dari setiap benda uji beton. Sedangkan pengujian UPV menghasilkan data berupa *waveform* dari gelombang yang diterima receiver pada setiap benda uji dan kemudian diolah menggunakan aplikasi PL-Link di komputer. Dari setiap *waveform* tersebut didapatkan beberapa parameter gelombang yaitu waktu transmisi dan amplitudo gelombang. Data-data tersebut kemudian dikelompokkan untuk masing-masing variasi kuat tekan dari beton.



Gambar 3.5 Tampilan data hasil pengujian UPV menggunakan aplikasi PL-Link.

Tabel 3.2 Form Pengujian Kuat Tekan Beton Silinder

Benda Uji	Sampel	Berat	Luas Penampang	Beban Maksimum	$f_c$	Rata-Rata
		kg	$\text{cm}^2$	kN	MPa	MPa
A	1					
	2					
	3					

Tabel 3.2 Form Pengujian Kuat Tekan Beton Menggunakan Uji Hammer

Benda Uji	Sampel	Kuat Tekan (Uji Hammer)		Rata-Rata
		$\text{kg/cm}^2$	MPa	MPa
A	1			
	2			
	3			

Tabel 3.3 Form Parameter-Parameter Gelombang

Benda Uji	Sampel	Waktu ( $\mu$ s)				Amplitudo (%)		
		T0	T1	Tmaks	T2	A1	Amaks	A2
A	1							
	2							
	3							

### **3.8.2 Pengolahan Data**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kerapatan dari beton berdasarkan cepat rambat dan waktu transmisi menggunakan alat UPV. Pada penelitian ini parameter kerapatan beton didasarkan pada nilai kuat tekan dari beton. Data-data kuat tekan dan parameter gelombang yang telah diambil dari hasil pengujian kemudian dilakukan seleksi data dengan standar deviasi untuk membuang data-data yang menyimpang. Dari data-data yang telah diseleksi kemudian disusun tabel dan grafik untuk mendapatkan hubungan dan korelasi antara parameter-parameter gelombang dengan kuat tekan dari beton.

Dari data-data di atas diambil satu sampel yang dipakai sebagai acuan dalam perbandingan karakteristik beton. Kriteria yang dipakai dalam memilih sampel acuan yaitu selisih yang paling kecil antara kuat tekan beton dari uji tekan dengan uji hammer. Kemudian dari seluruh data-data tersebut dikelompokkan berdasarkan nilai relatif terhadap sampel acuan untuk mengetahui hubungan kuat tekan beton dengan karakteristik gelombangnya.

### **3.8.3 Hipotesis**

Berdasarkan hasil kajian pustaka, maka penelitian diharapkan akan memberikan hasil yaitu:

1. Terdapat korelasi antara kuat tekan beton dengan parameter-parameter gelombang.
2. Terdapat kesamaan karakteristik beton sesuai dengan pola dari parameter gelombang yang terjadi.

## **BAB IV**

### **HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Hasil Pengujian Bahan Penyusun Beton**

##### **4.1.1 Air**

Air yang digunakan dalam pembuatan benda uji beton pada penelitian merupakan air bersih yang berasal dari PDAM Kota Malang. Air tersebut tidak perlu diuji karena dianggap telah memenuhi syarat bahan campuran beton.

##### **4.1.2 Semen**

Semen yang digunakan adalah semen portland tipe I yang diproduksi oleh PT Semen Gresik dan telah memenuhi standar bahan pengikat dalam campuran beton pada umumnya sehingga tidak perlu dilakukan pengujian lagi.

##### **4.1.3 Agregat Kasar**

Agregat kasar yang digunakan yaitu batu pecah yang diperoleh dari daerah Kota Malang. Hasil pemeriksaan agregat kasar terdapat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 *Hasil Pemeriksaan Agregat Kasar*

<b>Pemeriksaan</b>	<b>Hasil</b>	<b>Satuan</b>
Gradasi Agregat	Zona 3 (40 mm)	-
Kadar Air	5,7	%
Berat Isi	1575	gr/cc
Berat Jenis (SSD)	2,713	-
Penyerapan	1,01	%

Sumber: Hasil Penelitian

##### **4.1.4 Agregat Halus**

Agregat halus yang digunakan adalah pasir alam yang diperoleh dari toko komersial agregat di Kota Malang. Hasil pemeriksaan agregat halus terdapat pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Hasil Pemeriksaan Agregat Halus

Pemeriksaan	Hasil	Satuan
Gradasi Agregat	Zona 2	-
Kadar Air	0,47	%
Berat Isi	1640,625	gr/cc
Berat Jenis (SSD)	2,647	-
Penyerapan	2,27	%

Sumber: Hasil Penelitian

## 4.2 Pembuatan Benda Uji

### 4.2.1 Perencanaan Campuran (*Mix Design*) Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini beton mutu tinggi tanpa tulangan, dengan benda uji utama berupa silinder dan benda uji kontrol berupa kubus. Dimensi dari benda uji silinder yaitu diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, sedangkan benda uji kubus yaitu 15 x 15 x 15 cm. Direncanakan 4 variasi campuran (*mix design*) dengan kuat tekan rencana sebesar 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, dan 35 MPa. Perencanaan campuran beton dilakukan berdasarkan pedoman dari SNI-03-2834-2000 tentang Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Hasil perhitungan proporsi kebutuhan bahan dari setiap variasi terdapat pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Kebutuhan Bahan untuk Campuran Bahan Benda Uji

Benda Uji	(Kuat Tekan Rencana) (MPa)	Kebutuhan			
		Semen (kg)	Air (kg)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)
A	20	26,53	11,62	47,92	79,91
B	25	28,65	11,47	44,09	81,78
C	30	31,15	11,45	42,01	81,38
D	35	34,11	11,44	39,82	80,61
Jumlah		<b>120,45</b>	<b>45,98</b>	<b>173,85</b>	<b>323,68</b>

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari perencanaan campuran tersebut dilakukan proses pembuatan benda uji. Benda uji yang berhasil dibuat yaitu 36 buah benda uji silinder dengan rincian yaitu benda uji A, B, C, dan D masing-masing sebanyak 9 buah, serta 10 buah benda uji kubus dengan rincian yaitu benda uji A sebanyak 1 buah dan benda uji B, C, dan D masing masing sebanyak 3

buah. Setelah proses pengecoran, dilakukan proses perawatan atau *curing* selama 14 hari kemudian dilakukan pengujian pada saat umur beton 28 hari.

#### 4.2.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Menggunakan Uji Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan pada seluruh benda uji, baik silinder maupun kubus. Pengujian tekan menggunakan *Compression Test Machine* bertujuan untuk mendapatkan beban maksimum yang dapat ditahan oleh benda uji, sehingga dapat dihitung kuat tekan dari beton tersebut. Pengujian dilakukan pada saat beton berumur 28 hari, sehingga tidak perlu dikali dengan faktor koreksi kuat tekan terhadap umur beton. Hasil pengujian kuat tekan untuk benda uji silinder terdapat pada tabel 4.4. Adapun cara menghitung kuat tekan benda uji silinder ( $f'_c$ ) yaitu menggunakan rumus (4-1) sebagai berikut, dengan luasan bidang tekan (A) yang dipakai yaitu luas lingkaran dengan diameter 15 cm.

$$f'_c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (4-1)$$

Dengan:

$f'_c$  = kuat tekan (MPa)

P = beban maksimum (N)

A = luas bidang tekan ( $\text{mm}^2$ )

Contoh perhitungan:

Benda uji : A.1

Diameter : 15 cm

Beban maks. : 280 kN = 280000 N

Luas :  $A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \times \pi \times 15^2 = 176,786 \text{ cm}^2 = 17678,6 \text{ mm}^2$

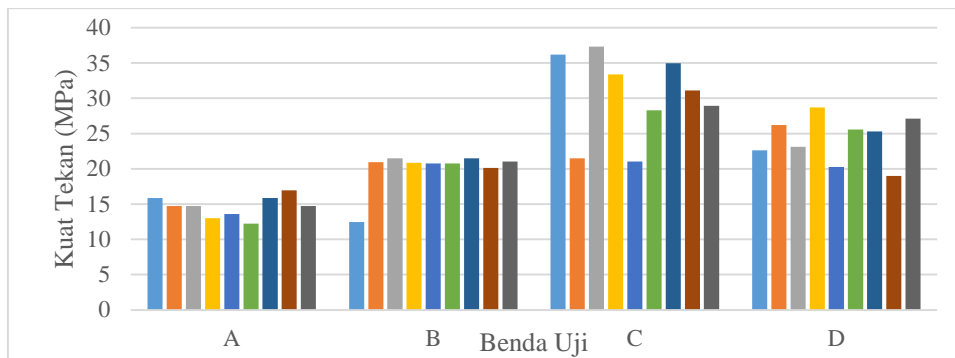
Maka kuat tekan benda uji:  $f'_c = \frac{280000}{17678,6} = 15,838 \text{ MPa}$

Sedangkan luasan bidang tekan untuk benda uji kubus adalah luas persegi dengan dimensi 15 cm. Kuat tekan yang didapatkan dari pengujian benda uji kubus merupakan kuat tekan karakteristik, sehingga dari rumus (4-1) perlu dikonversi menjadi kuat tekan ( $f'_c$ ) dengan dikali 83%. Hasil pengujian kubus terdapat pada tabel 4.5. Pengujian kuat tekan kubus ini hanya digunakan sebagai kontrol terhadap mutu aktual dari campuran beton.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kuat Tekan Silinder Menggunakan Uji Tekan

Benda Uji	Sampel	Berat (kg)	Berat Isi (kg/m <sup>3</sup> )	Luas (mm <sup>2</sup> )	Beban Maksimum (N)	f <sub>c</sub> (MPa)	Rata-Rata (MPa)
A	1	13	2451,2	17678,6	280000	15,838	14,619
	2	12,8	2413,5	17678,6	260000	14,707	
	3	13,15	2479,5	17678,6	260000	14,707	
	4	12,8	2413,5	17678,6	230000	13,010	
	5	12,9	2432,3	17678,6	240000	13,576	
	6	13	2451,2	17678,6	216000	12,218	
	7	12,9	2432,3	17678,6	280000	15,838	
	8	12,85	2422,9	17678,6	300000	16,970	
	9	12,55	2366,3	17678,6	260000	14,707	
B	1	13	2451,2	17678,6	220000	12,444	19,993
	2	13	2451,2	17678,6	370000	20,929	
	3	13,15	2479,5	17678,6	380000	21,495	
	4	13,05	2460,6	17678,6	369000	20,873	
	5	13	2451,2	17678,6	367000	20,760	
	6	13,05	2460,6	17678,6	367000	20,760	
	7	12,95	2441,8	17678,6	380000	21,495	
	8	12,9	2432,3	17678,6	356000	20,137	
	9	12,95	2441,8	17678,6	372000	21,042	
C	1	13,2	2488,9	17678,6	640000	36,202	30,300
	2	13,3	2507,7	17678,6	380000	21,495	
	3	13,25	2498,3	17678,6	660000	37,333	
	4	13,2	2488,9	17678,6	590000	33,374	
	5	13,25	2498,3	17678,6	372000	21,042	
	6	13,35	2517,2	17678,6	500000	28,283	
	7	13,35	2517,2	17678,6	618000	34,958	
	8	13,1	2470,0	17678,6	550000	31,111	
	9	13,1	2470,0	17678,6	511000	28,905	
D	1	13,1	2470,0	17678,6	400000	22,626	24,204
	2	13,2	2488,9	17678,6	463000	26,190	
	3	13,05	2460,6	17678,6	409000	23,135	
	4	13,15	2479,5	17678,6	507000	28,679	
	5	13,1	2470,0	17678,6	358000	20,251	
	6	13,05	2460,6	17678,6	452000	25,568	
	7	13,1	2470,0	17678,6	447000	25,285	
	8	13,15	2479,5	17678,6	336000	19,006	
	9	13,05	2460,6	17678,6	479000	27,095	

Sumber: Hasil Penelitian



Gambar 4.1 Kuat Tekan Sampel Beton Silinder dengan Uji Tekan

Sumber: Hasil Penelitian

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Kubus Menggunakan Uji Tekan

Benda Uji	Sampel	Berat (kg)	Luas (mm <sup>2</sup> )	Beban Maksimum (N)	f <sub>c</sub> (MPa)	Rata-Rata (MPa)
A	10	8,2	22500	402000	14,829	14,829
	10	8,1	22500	515000	18,998	
B	11	8,8	22500	759000	27,999	25,343
	12	8,25	22500	787000	29,032	
C	10	8,3	22500	878000	32,388	35,954
	11	8,95	22500	977000	36,040	
	12	8,4	22500	1069000	39,434	
D	10	8,25	22500	804000	29,659	29,782
	11	9,1	22500	933000	34,417	
	12	8,3	22500	685000	25,269	

Sumber: Hasil Penelitian

Hasil pengujian kuat tekan pada tabel 4.4 dan 4.5 menunjukkan bahwa kuat tekan beton aktual sebagian besar lebih kecil dari kuat tekan rencana, dapat disebabkan oleh proses pengerjaan beton yang kurang sempurna baik pada saat pengadukan hingga proses vibrasi. Selain itu didapatkan bahwa kuat tekan rata-rata untuk campuran benda uji D lebih kecil dari benda uji C. Hal ini disebabkan karena material kerikil yang digunakan pada campuran D tercampur dengan kerikil yang lebih ringan (berat isi lebih kecil dari seharusnya), terlihat pada data tersebut berat isi sampel D relatif lebih kecil dari sampel C yang menunjukkan bahwa kerapatannya juga lebih kecil. Sehingga dalam proporsi berat yang sama, volume kerikil dalam campuran menjadi lebih besar dari yang direncanakan dan dapat mengurangi kekuatan dari beton.



#### 4.2.4 Hasil Pengujian Kuat Tekan Menggunakan Uji *Hammer*

Sebelum benda uji diuji tekan, terlebih dahulu dilakukan pengujian *hammer* pada setiap benda uji. Hasil pengujian *hammer* dari benda uji silinder terdapat pada tabel 4.6 berikut. Pengujian dilakukan menggunakan alat *Schmidt Hammer* dari PROCEQ dengan hasil output berupa nilai *rebound* yang langsung dikonversi oleh alat tersebut menjadi kuat tekan beton karakteristik dengan satuan ( $\text{kg/cm}^2$ ). Nilai tersebut perlu diubah satuannya serta dikonversi lagi menjadi kuat tekan  $f'_c$  (MPa) agar dapat dilakukan perbandingan. Adapun cara menghitung kuat tekan benda uji ( $f'_c$ ) yaitu menggunakan rumus (4-2) sebagai berikut.

$$f'_c = f_{ck} \times 0,83 \dots \dots \dots (4-2)$$

Dengan:

$f_{ck}$  = kuat tekan beton karakteristik (MPa)

$f'_c$  = kuat tekan beton (MPa)

Contoh perhitungan (Benda uji A.1):

$f_{ck} = 170 \text{ kg/cm}^2 \times 10 = 17 \text{ MPa}$

$f'_c = 17 \times 0,83 = 14,110 \text{ MPa}$

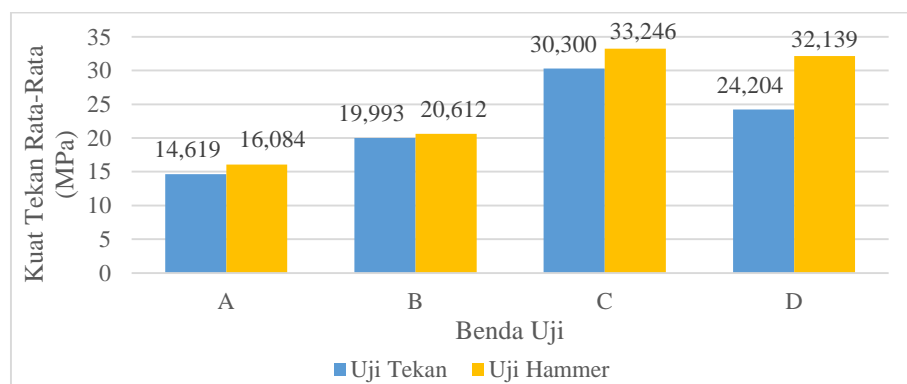
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kuat Tekan Menggunakan Uji *Hammer*

Benda Uji	Sampel	Kuat Tekan (Uji <i>Hammer</i> )	Kuat Tekan (Uji <i>Hammer</i> )	Kuat Tekan Rata-Rata
		K ( $\text{kg/cm}^2$ )	$f'_c$ (MPa)	$f'_c$ (MPa)
A	1	170,000	14,110	16,084
	2	195,000	16,185	
	3	179,000	14,857	
	4	220,000	18,260	
	5	240,000	19,920	
	6	235,000	19,505	
	7	170,000	14,110	
	8	165,000	13,695	
	9	170,000	14,110	
B	1	205,000	17,015	
	2	230,000	19,090	
	3	260,000	21,580	
	4	230,000	19,090	

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kuat Tekan Menggunakan Uji Hammer (Lanjutan)

Benda Uji	Sampel	Kuat Tekan (Uji <i>Hammer</i> )	Kuat Tekan (Uji <i>Hammer</i> )	Kuat Tekan Rata-Rata
		K (kg/cm <sup>2</sup> )	f <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>c</sub> (MPa)
B	5	255,000	21,165	20,612
	6	260,000	21,580	
	7	275,000	22,825	
	8	265,000	21,995	
	9	255,000	21,165	
C	1	350,000	29,050	33,246
	2	400,000	33,200	
	3	335,000	27,805	
	4	405,000	33,615	
	5	425,000	35,275	
	6	405,000	33,615	
	7	430,000	35,690	
	8	440,000	36,520	
	9	415,000	34,445	
D	1	385,000	31,955	32,139
	2	405,000	33,615	
	3	395,000	32,785	
	4	360,000	29,880	
	5	380,000	31,540	
	6	330,000	27,390	
	7	405,000	33,615	
	8	445,000	36,935	
	9	380,000	31,540	

Sumber: Hasil Penelitian

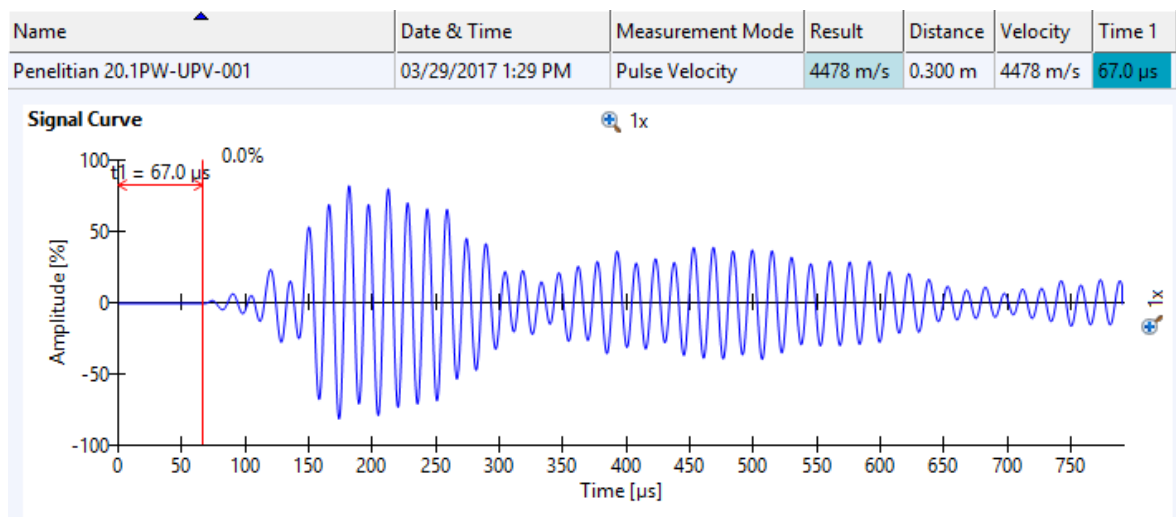


Gambar 4.2 Perbandingan Kuat Tekan dengan Uji Tekan dan Uji Hammer

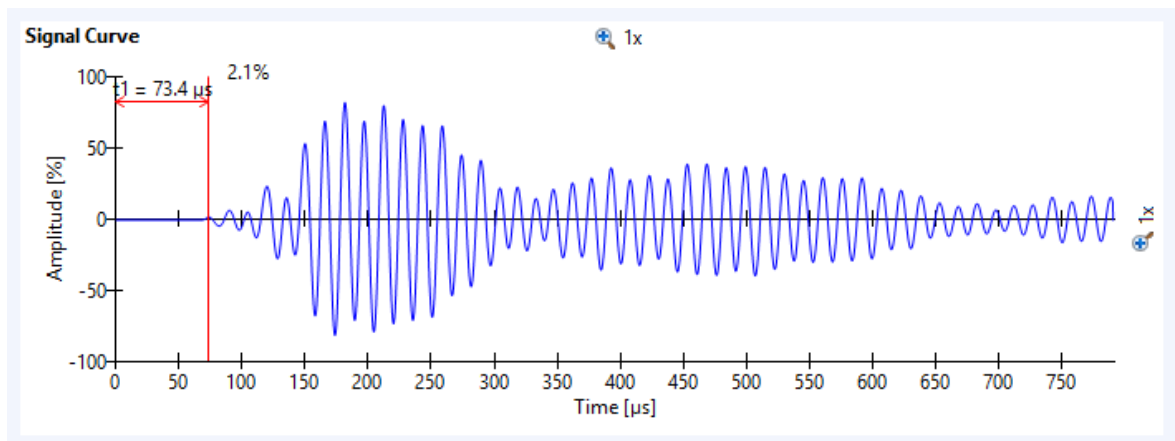
Sumber: Hasil Penelitian

### 4.3 Hasil Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

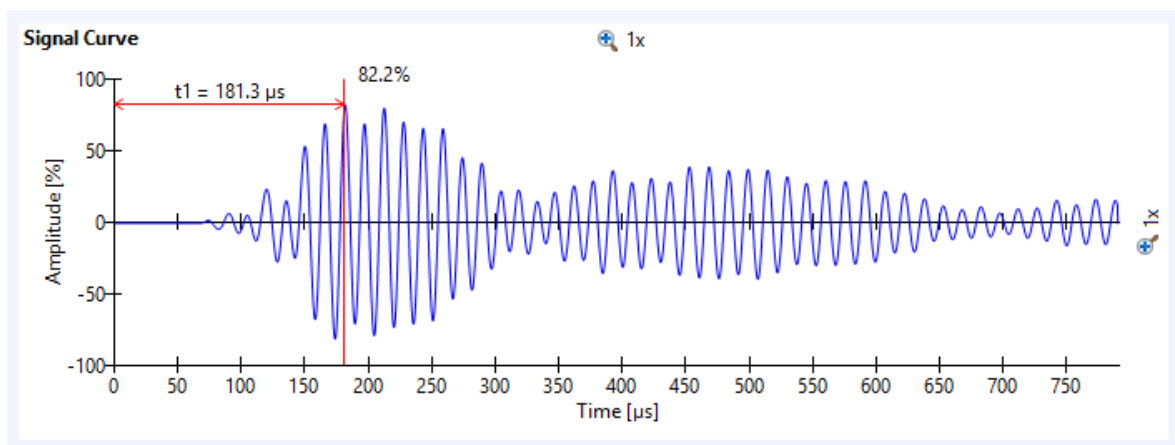
Pengujian UPV hanya dilakukan pada benda uji silinder (sampel nomor 1 sampai 9). Pengujian dilakukan menggunakan alat PUNDIT PL-200 dari PROCEQ dengan menggunakan 2 (dua) mode pengukuran yaitu mode *transmission time* (TT) dan *pulse velocity* (PV) pada sampel yang sama. Pada penggunaan umum, kedua moda tersebut menghasilkan data yang berbeda, di mana output dari mode TT yaitu waktu transmisi gelombang sedangkan output dari mode PV yaitu cepat rambat gelombang. Untuk mendapatkan cepat rambat gelombang yang perlu diinputkan pada alat yaitu jarak rambat, di mana pada penelitian ini yang menggunakan metode langsung (*direct method*) maka jaraknya yaitu tinggi silinder yaitu 30 cm yang kemudian dibagi dengan waktu transmisi sesuai dengan rumus (2-4). Kedua moda tersebut menghasilkan output asli (*raw*) yang sama yaitu berupa *waveform* yang kemudian dianalisis menggunakan software PL-Link untuk mengambil parameter-parameter gelombang seperti waktu transmisi dan amplitudo yang terdapat pada gambar 4.3 – 4.6. Beberapa parameter yang diambil antara lain (1)  $t_0$  yaitu waktu gelombang pertama terdeteksi, (2)  $t_1$  dan  $A_1$  yaitu waktu dan amplitudo gelombang pertama, (3)  $t_{maks}$  dan  $A_{maks}$  yaitu waktu dan amplitudo gelombang ketika maksimum, serta (4)  $t_2$  dan  $A_2$  yaitu waktu dan amplitudo ketika terjadi pergantian fase gelombang pertama. Sebagai contoh pada gambar 4.3 – 4.6, untuk sampel A1-01 (PV) didapatkan  $t_0$  sebesar 67  $\mu s$ ;  $t_1$  sebesar 73,4  $\mu s$ ;  $A_1$  sebesar 2,1%;  $t_{maks}$  sebesar 181,3  $\mu s$ ;  $A_{maks}$  sebesar 82,2%;  $t_2$  sebesar 332,7  $\mu s$ ; serta  $A_2$  sebesar 15%.



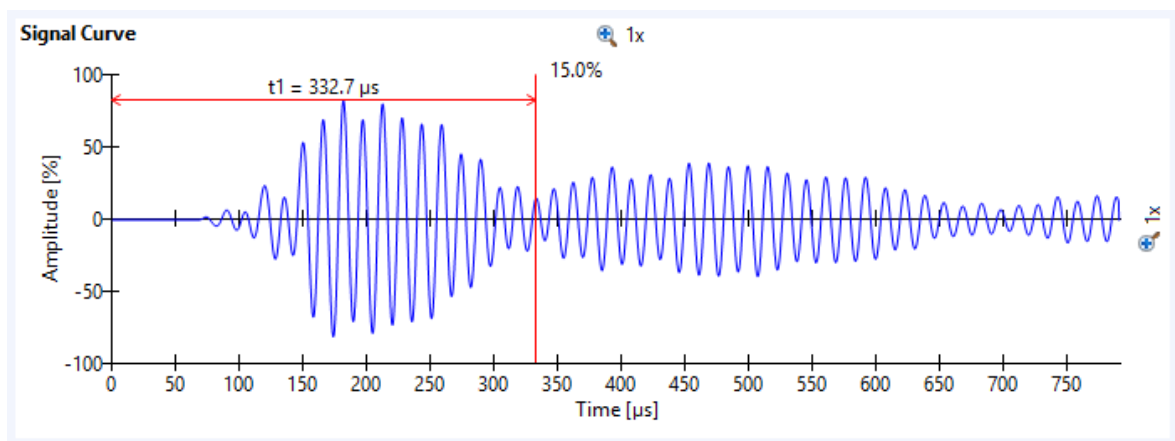
Gambar 4.3 Contoh Pengambilan Parameter  $t_0$ .



Gambar 4.4 Contoh Pengambilan Parameter  $t_1$  dan  $A_1$ .



Gambar 4.5 Contoh Pengambilan Parameter  $t_{maks}$  dan  $A_{maks}$ .



Gambar 4.6 Contoh Pengambilan Parameter  $t_2$  dan  $A_2$ .

#### 4.3.1 Pengukuran dengan Moda TT (*Transmission Time*)

Pengujian dilakukan pada setiap benda uji silinder, di mana 3 sampelnya dari setiap variasi diuji sebanyak lebih dari 1 (satu) kali. Hasil pengujian dan analisis *waveform* untuk moda TT terdapat pada Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 *Rekapitulasi Data Parameter Waveform TT*

Benda Uji	Sampel	Waktu ( $\mu$ s)				Amplitudo (%)		
		T0	T1	Tmaks	T2	A1	Amaks	A2
A	1	67,1	73,6	181,2	241,6	1,8	75,2	34
		67,3	73,7	181	242,8	1,4	87,8	62
		66,9	73,7	181,9	335,1	1,9	77,5	22
		67,3	73,7	181	333,9	2,1	90,3	14
		67,3	73,7	211,3	304,8	1,6	52,7	23
	2	65,8	71,2	177,5	238	1,1	70,2	32
		68,3	73,7	181	263,1	0,7	44,8	7
	3	66,3	72,9	255,8	196,7	2,3	84,4	23
		67,1	74,2	212,1	342,9	5,2	88,6	13
		67,9	73,3	180,1	225,8	2,3	76,6	59
		66,5	73,3	240	195,5	2,8	100,1	57
		67,8	72,9	220,8	177,3	1,8	34,4	6
	4	67,7	72,5	367,7	236,8	1,8	47,9	9
		67,1	72	179,2	195,5	1,7	67	33
		67	71,6	178,4	240,4	1,3	52,2	7
		66,7	72,9	220,8	165,1	5	83,3	17
		66,7	73,7	319,3	195,5	4,9	71,3	14
	5	68,2	74,2	273,1	228,3	1,6	68,9	37
	6	66,2	73,7	271,3	197,9	1,5	71,5	18
	7	67,5	74,6	248,7	422,7	2,6	58,6	21
	8	66,8	72,9	180,1	225,8	2,3	71,9	18
	9	68,2	73,3	227	358	2,3	80,8	8
B	1	65,8	70,3	176,6	325,5	1	57,4	8
		65,2	71,2	251,4	400,3	1,9	85,5	5
		64,6	71,2	252,2	311,1	1,3	52,5	22
	2	67,2	72	174,8	325,5	2,5	54,5	7
		67,8	71,6	277,5	398,8	2,8	46,5	11
		67	71,2	173,2	219,8	2,1	64,3	38
	3	65	69,4	177,5	239,2	1,6	64,9	32
		65,2	70,3	252,7	395,3	0,8	57,2	6
	4	66,6	72	211,2	273,9	1,3	69,6	17
	5	65,1	71,2	176,6	256,1	2,6	86	12
	6	66	70,7	297,5	450	1,3	69	1
	7	64,2	69,4	174	236,8	1,6	43,9	22
	8	64,5	68,6	299,2	253,8	1,4	66	47
	9	65,1	73,3	211,9	275,6	0,8	64,1	44

Tabel 4.7 *Rekapitulasi Data Parameter Waveform TT (Lanjutan)*

Benda Uji	Sampel	Waktu ( $\mu$ s)				Amplitudo (%)		
		T0	T1	Tmaks	T2	A1	Amaks	A2
C	1	63,9	67,7	167,1	184,6	6,6	60,3	20
		64,2	67,7	293,4	183,3	2,3	66,5	26
		63,6	67,7	166,2	290,2	3,2	78,3	18
	2	61,9	67,7	240,9	360,6	1,2	70,4	39
		62	67,3	241,1	331,5	1,9	41,8	18
		61	67,7	314,3	188,2	1,7	51,7	7
	3	65,3	69,4	337,5	259,8	3,9	46,5	22
		62,3	68,6	416,5	161,5	6,5	59	16
		65,1	69	168,1	275,5	4,1	49,3	12
		61,6	68,6	134,7	166,3	3,6	58,2	10
		64,1	69	209,3	178,5	6,5	75,3	19
		62,2	68,6	208	167,6	3,7	74,6	15
	4	62,8	68,6	247,2	377,5	1,8	58,6	5
	5	61,5	67,7	263,8	373,4	1,2	71,7	17
	6	64	69,4	242,8	488,2	1,3	62	4
	7	62,1	67,3	264,2	295,1	1	76,8	48
	8	62,1	65,6	239,8	172,4	1,4	50,3	10
	9	62,6	67,3	241,1	167,6	1,9	70,9	15
D	1	64,2	70,7	355,7	206,4	3,3	69,6	14
		64,5	70,8	250,1	219,8	4,1	67,2	32
		63,1	70,7	321,7	184,6	4	77,4	3
	2	64,5	70,1	251,2	420,1	2,5	71,6	12
		65,7	69,9	383,5	183,3	2,4	57	7
		64,2	69,9	324,3	160,3	3	77	12
	3	64,6	70,3	352,6	288,6	2,5	56,1	12
		63,8	69,9	324,7	458,2	2,2	71	13
		64,2	69,4	579,2	189,4	2,6	74,5	9
	4	64	69,4	205,3	281,7	2,2	72,7	27
	5	63,9	69,4	173,2	336,5	2,1	65,2	6
	6	63,7	69	206,2	281,1	1,7	71,6	16
	7	64	71,2	174,5	279,3	2,6	93,5	24
	8	65,1	69,9	205	264,7	3	69,3	15
	9	65,1	70,3	206,7	264,9	2,3	62,1	8

Sumber: Hasil Penelitian

#### 4.3.2 Pengukuran dengan Moda PV (*Pulse Velocity*)

Hasil pengujian dan analisis *waveform* untuk moda PV terdapat pada Tabel 4.8 berikut. Berdasarkan data tersebut, menurut tabel 2.2 sampel beton tersebut dapat dikualifikasikan memiliki kualitas atau kerapatan yang baik dengan cepat rambat (*pulse velocity*) berkisar antara 3500 hingga 4500 m/s.

Tabel 4.8 *Rekapitulasi Data Parameter Waveform PV*

Benda Uji	Sampel	Cepat Rambat	Waktu ( $\mu$ s)				Amplitudo (%)		
		(m/s)	T0	T1	Tmax	T2	A1	Amax	A2
A	1	4237	67,0	73,4	181,3	332,700	2,100	82,200	15,000
		4261	67,1	73,5	211,6	303,600	2,500	72,700	12,600
		4243	67,0	73,3	181,3	306,000	2,200	61,900	10,100
		4286	66,6	73,0	208,6	346,000	2,600	74,300	33,300
		4249	67,2	73,2	180,7	244,100	2,300	75,000	17,500
	2	4304	66,4	71,5	178,3	224,600	1,900	82,900	32,100
		4310	66,9	72,8	353,5	269,600	4,400	65,100	8,400
	3	4225	68,1	73,3	180,8	288,800	0,600	17,100	7,900
		4280	67,2	72,8	223,7	371,500	2,900	77,300	8,400
		4231	66,8	74,2	195,2	273,200	2,200	50,600	5,300
		4231	68,7	73,4	313,0	252,700	1,100	26,600	15,600
		4298	66,2	72,3	371,6	308,400	2,500	72,100	44,300
	4	4292	67,1	70,9	251,0	461,400	1,300	65,300	18,800
		4202	68,7	74,5	449,3	238,000	3,600	92,100	13,700
		4304	67,1	72,6	311,7	190,600	3,700	68,200	12,800
		4310	66,3	72,1	389,8	331,500	2,600	70,000	8,000
		4237	67,8	73,6	231,6	154,200	4,100	61,900	13,900
	5	4231	68,3	72,9	178,9	331,500	1,900	74,400	16,900
	6	4225	67,2	73,5	285,6	240,400	1,800	73,200	18,800
	7	4184	68,7	73,7	419,8	137,200	1,700	59,000	12,000
	8	4261	67,0	72,5	177,7	327,800	2,100	67,200	0,400
	9	4342	66,2	72,2	211,0	241,600	4,400	88,600	40,800
B	1	4342	65,0	70,9	312,3	193,100	1,400	78,700	19,100
		4399	65,5	70,4	235,3	190,600	1,100	51,100	29,500
		4373	64,9	71,0	232,8	171,200	1,700	92,500	9,500
	2	4310	67,5	72,0	320,9	172,400	3,400	69,400	11,600
		4292	67,3	71,4	393,1	171,200	1,600	67,900	10,100
	3	4380	65,2	69,9	224,3	432,300	1,400	62,200	11,000
		4418	65,5	69,4	252,2	190,600	1,800	78,800	5,600
		4405	64,7	69,8	237,1	347,300	1,600	55,300	5,800
	4	4348	66,0	71,4	147,9	326,600	2,500	69,100	8,800
	5	4373	64,9	70,8	175,2	318,100	2,100	86,800	13,900
	6	4458	64,6	69,3	174,6	286,600	1,100	76,200	26,000
	7	4471	64,1	69,9	205,5	364,300	3,600	80,300	13,400
	8	4471	64,3	68,5	205,5	359,400	1,600	74,800	3,100
	9	4380	65,5	71,3	179,5	340,000	1,400	74,900	38,100
C	1	4505	64,7	68,8	213,4	289,000	5,100	78,800	36,600
		4511	64,5	68,1	291,6	426,200	2,900	61,000	22,100
	2	4724	61,4	68,2	344,5	224,600	4,000	81,400	17,000

Tabel 4.8 *Rekapitulasi Data Parameter Waveform PV (Lanjutan)*

Benda Uji	Sampel	Cepat Rambat	Waktu ( $\mu$ s)				Amplitudo (%)		
		(m/s)	T0	T1	Tmax	T2	A1	Amax	A2
C	2	4673	61,6	68,1	275,3	184,600	2,100	72,900	8,300
		4702	61,6	65,9	268,6	194,300	4,000	83,300	29,700
	3	4532	64,6	68,5	194,0	329,100	7,000	81,400	5,900
		4644	62,3	67,4	194,0	284,100	4,400	75,500	19,400
		4552	63,5	68,3	400,7	282,900	10,400	84,700	4,300
		4644	61,5	66,7	208,6	163,900	2,800	71,300	3,200
		4505	63,8	68,6	193,4	252,600	5,300	67,100	8,000
		4688	62,2	65,6	135,8	196,700	3,000	62,700	17,800
	4	4587	62,3	67,5	261,9	427,400	1,700	71,800	3,600
	5	4622	62,1	65,8	263,2	466,300	1,400	60,800	2,300
	6	4552	63,3	69,6	242,5	166,300	1,700	75,900	4,900
	7	4666	62,4	66,0	263,8	463,800	3,200	62,100	8,000
	8	4673	62,1	65,3	238,2	176,100	1,800	76,700	15,200
	9	4651	62,5	66,5	313,6	210,100	5,000	81,900	5,900
D	1	4471	65,0	70,5	323,9	176,100	2,900	75,000	16,300
		4498	64,2	69,6	246,8	172,400	3,000	75,000	7,500
		4511	64,4	69,4	247,4	174,800	4,100	82,900	23,300
		4444	64,9	69,8	384,1	221,000	2,900	81,500	13,200
	2	4418	64,9	70,4	207,3	285,300	3,400	81,600	19,700
		4412	65,3	70,1	173,4	284,100	3,000	70,200	30,200
	3	4438	64,3	70,7	319,7	230,700	2,300	85,500	2,400
		4438	63,7	71,4	303,9	205,200	2,400	76,900	17,400
		4458	64,1	70,9	319,0	261,100	2,700	75,100	3,400
	4	4505	63,6	69,5	174,0	270,800	4,900	100,100	19,100
	5	4464	64,8	70,2	172,8	235,600	3,600	92,700	15,400
	6	4478	64,4	69,8	173,4	225,800	3,200	90,400	10,400
	7	4380	65,5	71,8	174,6	235,600	3,400	72,100	5,500
	8	4471	64,8	70,0	157,8	236,800	7,300	100,100	37,700
	9	4451	65,3	70,2	145,5	235,600	4,300	84,400	23,100

Sumber: Hasil Penelitian

#### 4.3.3 Seleksi Data yang Menyimpang

Data-data yang kemudian dianalisis yaitu waktu transmisi ( $t_0$ ) dan amplitudo pertama (A1), dikarenakan parameter lain (Tmaks, Amaks, T2, dan A2) memiliki korelasi yang sangat kecil terhadap kuat tekan. Sebelumnya dilakukan seleksi data untuk membuang data-data yang menyimpang, yaitu data-data yang memiliki selisih dengan rata-rata yang melebihi standar deviasi (S). Hasil seleksi tersebut terdapat pada Tabel 4.9 – 4.12.



Tabel 4.9 Seleksi Data Parameter  $t_0$  Waveform TT

Benda Uji	Sampel	Waktu ( $\mu$ s)						Rata-rata Terkoreksi
		$t_0$	Rata-rata	S	MIN	MAX	OK	
A	1	67,1	67,18	0,178885	67,00111	67,35889	OK	67,25
		67,3					OK	
		66,9					NOT	
		67,3					OK	
		67,3					OK	
	2	65,8						65,8
	3	68,3	67,22	0,867179	66,35282	68,08718	NOT	67,166667
		66,3					NOT	
		67,1					OK	
		67,9					OK	
		66,5					OK	
	4	67,8	67,167	0,480278	66,68639	67,64694	NOT	66,875
		67,7					NOT	
		67,1					OK	
		67					OK	
		66,7					OK	
	5	68,2						68,2
	6	66,2						66,2
	7	67,5						67,5
	8	66,8						66,8
	9	68,2						68,2
B	1	65,8	65,2	0,6	64,6	65,8	OK	65,200
		65,2					OK	
		64,6					OK	
	2	67,2	67,333	0,416333	66,917	67,74967	OK	67,1
		67,8					NOT	
	3	67	65,1	0,141421	64,95858	130,0586	OK	65,1
		65					OK	
		65,2					OK	
		66,6						
		65,1						
		66						
		64,2						
		64,5						
	9	65,1						65,1

Tabel 4.9 Seleksi Data Parameter  $t_0$  Waveform TT (Lanjutan)

Benda Uji	Sampel	Waktu ( $\mu$ s)						Rata-rata Terkoreksi
		$t_0$	Rata-rata	S	MIN	MAX	OK	
C	1	63,9	63,9	0,3	63,6	64,2	OK	63,9
		64,2					OK	
		63,6					OK	
	2	61,9	61,633	0,550757	61,08258	62,18409	OK	61,95
		62					OK	
		61					NOT	
	3	65,3	63,433	1,604577	61,82876	65,03791	NOT	62,866667
		62,3					OK	
		65,1					NOT	
		61,6					NOT	
		64,1					OK	
		62,2					OK	
	4	62,8						62,8
	5	61,5						61,5
	6	64						64
	7	62,1						62,1
	8	62,1						62,1
	9	62,6						62,6
D	1	64,2	63,933	0,737111	63,19622	64,67044	OK	64,35
		64,5					OK	
		63,1					NOT	
	2	64,5	64,8	0,793725	64,00627	65,59373	OK	64,35
		65,7					NOT	
		64,2					OK	
	3	64,6	64,2	0,4	63,8	64,6	OK	64,2
		63,8					OK	
		64,2					OK	
	4	64						64
	5	63,9						63,9
	6	63,7						63,7
	7	64						64
	8	65,1						65,1
	9	65,1						65,1

Sumber: Hasil Penelitian

Tabel 4.10 *Seleksi Data Parameter t0 Waveform PV*

Benda Uji	Sampel	Waktu ( $\mu$ s)						Rata-rata terkoreksi
		t0	Rata-rata	S	MIN	MAX	OK	
A	1	67	66,98	0,228035	66,75196	67,20804	OK	67,075
		67,1					OK	
		67					OK	
		66,6					NOT	
		67,2					OK	
	2	66,4						66,4
	3	66,9	67,54	0,826438	66,71356	68,36644	OK	67,25
		68,1					OK	
		67,2					OK	
		66,8					OK	
		68,7					NOT	
	4	66,2	67,2	0,942338	66,25766	68,14234	NOT	67,075
		67,1					OK	
		68,7					NOT	
		67,1					OK	
		66,3					OK	
	5	67,8	68,3				OK	68,3
		68,3						
		67,2						
		68,7						
		67						
	9	66,2						66,2
B	1	65	65,133	0,321455	64,81188	65,45479	OK	64,950
		65,5					NOT	
		64,9					OK	
	2	67,5	67,4	0,141421	67,25858	67,54142	OK	67,4
		67,3					OK	
	3	65,2	65,133	0,404145	64,72919	129,8625	OK	65,35
		65,5					OK	
		64,7					NOT	
	4	66						66
	5	64,9						64,9
	6	64,6						64,6
	7	64,1						64,1
	8	64,3						64,3
	9	65,5						65,5

Tabel 4.10 *Seleksi Data Parameter t0 Waveform PV (Lanjutan)*

Benda Uji	Sampel	Waktu ( $\mu$ s)						Rata-rata terkoreksi
		t0	Rata-rata	S	MIN	MAX	OK	
C	1	64,7	64,6	0,141421	64,45858	64,74142	OK	64,6
		64,5					OK	
	2	61,4	61,533	0,11547	61,41786	61,6488	NOT	61,6
		61,6					OK	
	3	61,6	62,983	1,168617	61,81472	64,15195	OK	62,95
		64,6					OK	
		62,3					OK	
		63,5					OK	
		61,5					NOT	
		63,8					OK	
		62,2					OK	
	4	62,3						62,3
	5	62,1						62,1
	6	63,3						63,3
	7	62,4						62,4
	8	62,1						62,1
	9	62,5						62,5
D	1	65	64,53	0,416333	64,117	64,94967	NOT	64,3
		64,2					OK	
		64,4					OK	
	2	64,9	65,033	0,23094	64,80239	65,26427	OK	64,9
		64,9					OK	
		65,3					NOT	
	3	64,3	64,033	0,305505	63,72783	64,33884	OK	64,2
		63,7					NOT	
		64,1					OK	
	4	63,6						63,6
	5	64,8						64,8
	6	64,4						64,4
	7	65,5						65,5
	8	64,8						64,8
	9	65,3						65,3

Sumber: Hasil Penelitian

Tabel 4.11 *Seleksi Data Parameter AI Waveform TT*

Benda Uji	Sampel	Amplitudo (%)						Rata-rata Terkoreksi
		A1	Rata-rata	S	MIN	MAX	OK	
A	1	1,8	1,76	0,270185	1,489815	2,030185	OK	1,766667
		1,4					NOT	
		1,9					OK	
		2,1					NOT	
		1,6					OK	
	2	1,1						1,1
	3	0,7	2,66	1,625731	1,034269	4,285731	NOT	2,466667
		2,3					OK	
		5,2					NOT	
		2,3					OK	
		2,8					OK	
	4	1,8	2,75	1,714351	1,035649	4,464351	OK	1,65
		1,8					OK	
		1,7					OK	
		1,3					OK	
		5					NOT	
		4,9					NOT	
	5	1,6						1,6
	6	1,5						1,5
	7	2,6						2,6
	8	2,3						2,3
	9	2,3						2,3
B	1	1	1,4	0,458258	0,941742	1,858258	OK	1,150
		1,9					NOT	
		1,3					OK	
	2	2,5	2,467	0,351188	2,115478	2,817855	OK	2,65
		2,8					OK	
		2,1					NOT	
	3	1,6	1,2	0,565685	0,634315	1,834315	OK	1,2
		0,8					OK	
	4	1,3						1,3
	5	2,6						2,6
	6	1,3						1,3
	7	1,6						1,6
	8	1,4						1,4
	9	0,8						0,8

Tabel 4.11 *Seleksi Data Parameter AI Waveform TT (Lanjutan)*

Benda Uji	Sampel	Amplitudo (%)						Rata-rata Terkoreksi
		A1	Rata-rata	S	MIN	MAX	OK	
C	1	6,6					NOT	
		2,3	4,033	2,267892	1,765442	6,301225	OK	2,75
		3,2					OK	
	2	1,2					NOT	
		1,9	1,6	0,360555	1,239445	1,960555	OK	1,8
		1,7					OK	
	3	3,9					OK	
		6,5					NOT	
		4,1	4,717	1,392001	3,324666	6,108668	OK	3,825
		3,6					OK	
		6,5					NOT	
		3,7					OK	
	4	1,8						1,8
	5	1,2						1,2
	6	1,3						1,3
	7	1						1
	8	1,4						1,4
	9	1,9						1,9
D	1	3,3					NOT	
		4,1	3,8	0,43589	3,36411	4,23589	OK	4,05
		4					OK	
	2	2,5					OK	
		2,4	2,633	0,321455	2,311878	2,954788	OK	2,45
		3					NOT	
	3	2,5					OK	
		2,2	2,433	0,208167	2,225167	2,6415	NOT	2,55
		2,6					OK	
	4	2,2						2,2
	5	2,1						2,1
	6	1,7						1,7
	7	2,6						2,6
	8	3						3
	9	2,3						2,3

Sumber: Hasil Penelitian

Tabel 4.12 *Seleksi Data Parameter AI Waveform PV*

Benda Uji	Sampel	Amplitudo (%)						Rata-rata terkoreksi
		A1	Rata-rata	S	MIN	MAX	OK	
A	1	2,1	2,34	0,207364	2,132636	2,547364	NOT	2,333333
		2,5					OK	
		2,2					OK	
		2,6					NOT	
		2,3					OK	
	2	1,9						1,9
	3	4,4	2,24	1,507647	0,732353	3,747647	NOT	2,066667
		0,6					NOT	
		2,9					OK	
		2,2					OK	
		1,1					OK	
	4	2,5	2,967	1,03473	1,931936	4,001397	OK	3,1
		1,3					NOT	
		3,6					OK	
		3,7					OK	
		2,6					OK	
	5	4,1					NOT	1,9
		1,9						
		1,8						
		1,7						
		2,1						
	9	4,4						4,4
B	1	1,4	1,4	0,3	1,1	1,7	OK	1,400
		1,1					OK	
		1,7					OK	
	2	3,4	2,5	1,272792	1,227208	3,772792	OK	2,5
		1,6					OK	
	3	1,4	1,6	0,2	1,4	3	OK	1,6
		1,8					OK	
		1,6					OK	
	4	2,5						2,5
	5	2,1						2,1
	6	1,1						1,1
	7	3,6						3,6
	8	1,6						1,6
	9	1,4						1,4

Tabel 4.12 *Seleksi Data Parameter A1 Waveform PV (Lanjutan)*

Benda Uji	Sampel	Amplitudo (%)						Rata-rata terkoreksi
		A1	Rata-rata	S	MIN	MAX	OK	
C	1	5,1	4	1,555635	2,444365	5,555635	OK	4
		2,9					OK	
	2	4	3,367	1,096966	2,269701	4,463632	OK	4
		2,1					NOT	
	3	4	5,483	2,865252	2,618082	8,348585	OK	4,5
		7					OK	
		4,4					OK	
		10,4					NOT	
		2,8					OK	
		5,3					OK	
		3					OK	
	4	1,7						1,7
	5	1,4						1,4
	6	1,7						1,7
	7	3,2						3,2
	8	1,8						1,8
	9	5						5
D	1	2,9	3,333	0,665833	2,667501	3,999166	OK	2,95
		3					OK	
		4,1					NOT	
	2	2,9	3,1	0,264575	2,835425	3,364575	OK	2,95
		3,4					NOT	
	3	3	2,467	0,208167	2,2585	2,674833	OK	2,35
		2,3					OK	
		2,4					OK	
	4	2,7					NOT	4,9
		4,9						
		3,6						
		3,2						
		3,4						
		7,3						
		4,3						

Sumber: Hasil Penelitian

#### 4.4 Pengambilan Sampel Beton Acuan

Pada penelitian ini kemudian diambil sampel beton yang akan dijadikan sebagai beton acuan dalam menentukan kualitas beton berdasarkan karakteristik gelombangnya.



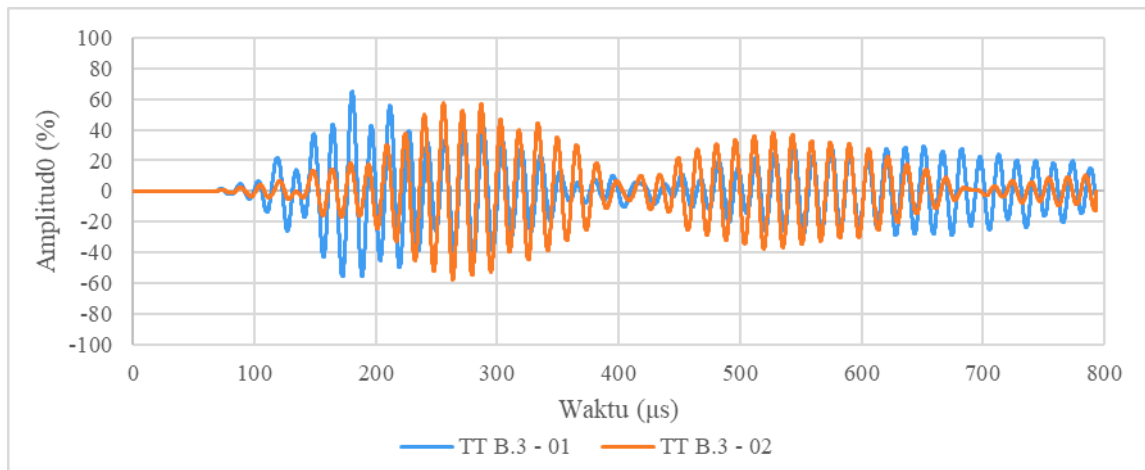
Sampel yang dijadikan acuan yaitu sampel silinder yang kuat tekan hasil *compression test machine* dengan *hammer test* relatif sama karena menunjukkan kerapatan yang seragam pada sampel tersebut. Pengambilan tersebut didasarkan pada nilai kesalahan relatif (KR) paling kecil seperti tampak pada tabel 4.13 berikut.

Tabel 4.13 *Perbandingan Kuat Tekan Hasil Uji Tekan dan Uji Hammer*

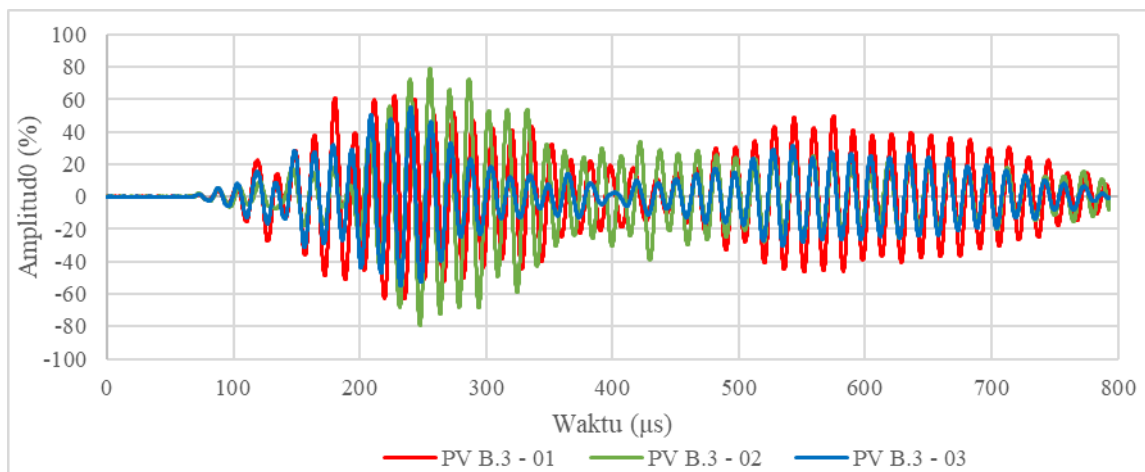
Benda Uji	Sampel	Kuat Tekan (Uji Tekan)	Kuat Tekan (Uji Hammer)	KR
		(MPa)	(MPa)	%
A	1	15,838	14,110	10,913
	2	14,707	16,185	10,049
	3	14,707	14,857	1,019
	4	13,010	18,260	40,352
	5	13,576	19,920	46,732
	6	12,218	19,505	59,639
	7	15,838	14,110	10,913
	8	16,970	13,695	19,297
	9	14,707	14,110	4,060
B	1	12,444	17,015	36,728
	2	20,929	19,090	8,788
	3	<b>21,495</b>	<b>21,580</b>	<b>0,396</b>
	4	20,873	19,090	8,541
	5	20,760	21,165	1,953
	6	20,760	21,580	3,952
	7	21,495	22,825	6,188
	8	20,137	21,995	9,225
	9	21,042	21,165	0,583
C	1	36,202	29,050	19,756
	2	21,495	33,200	54,455
	3	37,333	27,805	25,522
	4	33,374	33,615	0,723
	5	21,042	35,275	67,638
	6	28,283	33,615	18,853
	7	34,958	35,690	2,095
	8	31,111	36,520	17,386
	9	28,905	34,445	19,166
D	1	22,626	31,955	41,230
	2	26,190	33,615	28,351
	3	23,135	32,785	41,710
	4	28,679	29,880	4,189
	5	20,251	31,540	55,749
	6	25,568	27,390	7,127
	7	25,285	33,615	32,945
	8	19,006	36,935	94,333
	9	27,095	31,540	16,405

Sumber: Hasil Penelitian

Diperoleh sampel acuan yaitu sampel B.3 dengan KR sebesar 0,396% dari rata-rata sebesar 22,97%. Gambar 4.7 dan 4.8 berikut merupakan *waveform* hasil UPV dari sampel B3 yang diuji menggunakan metode TT sebanyak 2 kali dan metode PV sebanyak 3 kali. Dari *waveform* tersebut terlihat bahwa pada satu sampel yang sama, gelombang yang diterima dapat memiliki pola dari amplitudo yang relatif berbeda tetapi frekuensi dan panjang gelombang relatif terdapat kesesuaian.



Gambar 4.7 Waveform UPV pada sampel B3 (Metode TT).



Gambar 4.8 Waveform UPV pada sampel B3 (Metode PV).

Sumber: Hasil Penelitian

#### 4.5 Hubungan Antara Kuat Tekan Beton dengan Parameter Gelombang

Setelah data-data terkoreksi, kemudian setiap benda uji dirata-rata untuk dapat dicari hubungan antara kuat tekan beton dengan parameter-parameter gelombang. Perbandingan antara kuat tekan dan parameter gelombang  $t_0$  dan  $A_1$  disajikan pada tabel 4.14 hingga tabel 4.15.

Tabel 4.14 *Rekapitulasi Kuat Tekan serta Parameter  $t_0$  dan  $A_1$  untuk Waveform TT*

Benda Uji	Sampel	Kuat Tekan (Uji Tekan)	Kuat Tekan (Uji Hammer)	Waktu Transmisi ( $t_0$ )	Amplitudo ( $A_1$ )
		(MPa)	(MPa)	( $\mu$ s)	(%)
A	1	15,84	14,11	67,25	1,77
	2	14,71	16,185	65,8	1,1
	3	14,71	14,857	67,17	2,47
	4	13,01	18,26	66,88	1,65
	5	13,58	19,92	68,2	1,6
	6	12,22	19,505	66,2	1,5
	7	15,84	14,11	67,5	2,6
	8	16,97	13,695	66,8	2,3
	9	14,71	14,11	68,2	2,3
B	1	12,44	17,015	65,2	1,15
	2	20,93	19,09	67,1	2,65
	3	<b>21,49</b>	<b>21,58</b>	<b>65,1</b>	<b>1,2</b>
	4	20,87	19,09	66,6	1,3
	5	20,76	21,165	65,1	2,6
	6	20,76	21,58	66	1,3
	7	21,49	22,825	64,2	1,6
	8	20,14	21,995	64,5	1,4
	9	21,04	21,165	65,1	0,8
C	1	36,2	29,05	63,9	2,75
	2	21,49	33,2	61,95	1,8
	3	37,33	27,805	62,87	3,825
	4	33,37	33,615	62,8	1,8
	5	21,04	35,275	61,5	1,2
	6	28,28	33,615	64	1,3
	7	34,96	35,69	62,1	1
	8	31,11	36,52	62,1	1,4
	9	28,91	34,445	62,6	1,9
D	1	22,63	31,955	64,35	4,05
	2	26,19	33,615	64,35	2,45
	3	23,14	32,785	64,2	2,55
	4	28,68	29,88	64	2,2
	5	20,25	31,54	63,9	2,1
	6	25,57	27,39	63,7	1,7
	7	25,28	33,615	64	2,6
	8	19,01	36,935	65,1	3
	9	27,09	31,54	65,1	2,3

Sumber: Hasil Penelitian

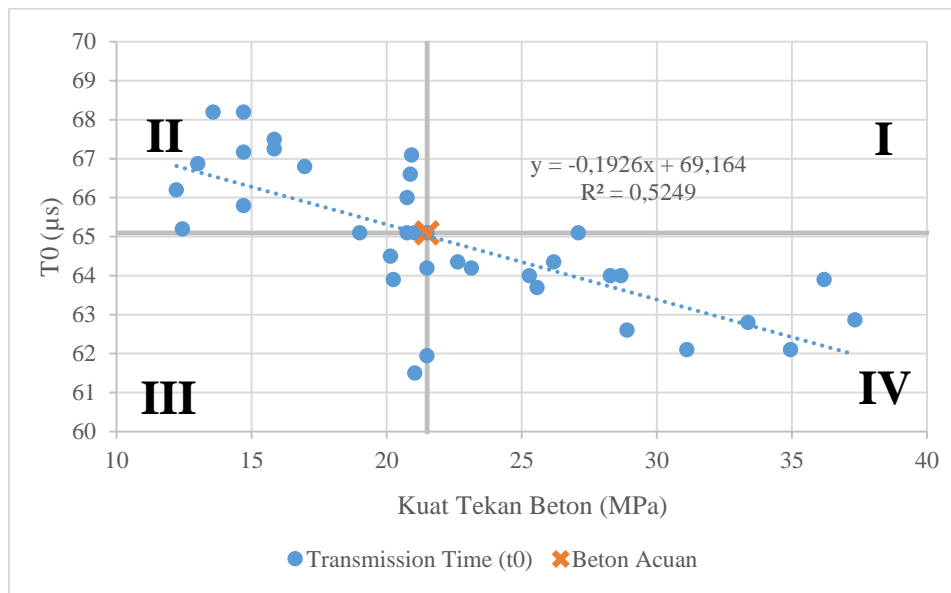
Tabel 4.15 *Rekapitulasi Kuat Tekan serta Parameter t0 dan A1 untuk Waveform PV*

Benda Uji	Sampel	Kuat Tekan (Uji Tekan)	Kuat Tekan (Uji Hammer)	Waktu Transmisi (t0)	Amplitudo (A1)
		(MPa)	(MPa)	( $\mu$ s)	(%)
A	1	15,84	14,11	67,075	2,333
	2	14,71	16,185	66,4	1,9
	3	14,71	14,857	67,25	2,067
	4	13,01	18,26	67,075	3,1
	5	13,58	19,92	68,3	1,9
	6	12,22	19,505	67,2	1,8
	7	15,84	14,11	68,7	1,7
	8	16,97	13,695	67	2,1
	9	14,71	14,11	66,2	4,4
B	1	12,44	17,015	64,95	1,4
	2	20,93	19,09	67,4	2,5
	3	<b>21,49</b>	<b>21,58</b>	<b>65,35</b>	<b>1,6</b>
	4	20,87	19,09	66	2,5
	5	20,76	21,165	64,9	2,1
	6	20,76	21,58	64,6	1,1
	7	21,49	22,825	64,1	3,6
	8	20,14	21,995	64,3	1,6
	9	21,04	21,165	65,5	1,4
C	1	36,2	29,05	64,6	4
	2	21,49	33,2	61,6	4
	3	37,33	27,805	62,95	4,5
	4	33,37	33,615	62,3	1,7
	5	21,04	35,275	62,1	1,4
	6	28,28	33,615	63,3	1,7
	7	34,96	35,69	62,4	3,2
	8	31,11	36,52	62,1	1,8
	9	28,91	34,445	62,5	5
D	1	22,63	31,955	64,3	2,95
	2	26,19	33,615	64,9	2,95
	3	23,14	32,785	64,2	2,35
	4	28,68	29,88	63,6	4,9
	5	20,25	31,54	64,8	3,6
	6	25,57	27,39	64,4	3,2
	7	25,28	33,615	65,5	3,4
	8	19,01	36,935	64,8	7,3
	9	27,09	31,54	65,3	4,3

Sumber: Hasil Penelitian

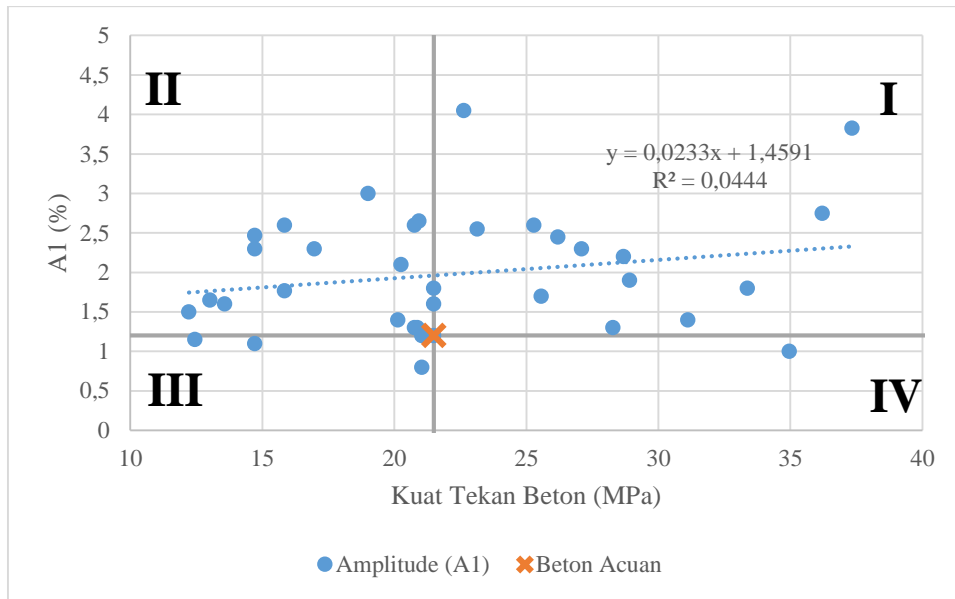
Dari data di atas dapat dilihat bahwa beton dengan satu campuran (*mix design*) yang sama dapat menghasilkan kuat tekan yang berbeda, dan sebagian besar kurang dari kuat tekan beton rencana. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya perbedaan kualitas/mutu dari suatu benda uji yang disebabkan oleh perbedaan kerapatan dari masing-masing benda uji yang dipengaruhi oleh komposisi dan susunan dari bahan-bahan penyusun beton. Kualitas dari beton tersebut sangat bergantung pada kualitas pengerjaan, mulai dari pencampuran bahan hingga pembuatan benda uji. Oleh karena itu yang dipakai dalam analisis pada penelitian ini adalah kuat tekan aktual dari masing-masing benda uji.

Hubungan kuat tekan beton dengan parameter gelombang ( $t_0$  dan  $A_1$ ) yang telah diseleksi ditampilkan pada gambar 4.7 – 4.10. Pada grafik 4.9 dan 4.11 yaitu hubungan kuat tekan beton dengan waktu transmisi ( $t_0$ ) ditunjukkan bahwa terdapat hubungan yang cukup signifikan baik dengan metode TT maupun PV. Meskipun tingkat sebaran data masih tergolong cukup ditunjukkan dengan nilai koefisien determinasi dari model regresi linear ( $R^2$ ) masing-masing sebesar 0,5249 dan 0,4953. Sedangkan untuk hubungan antara kuat tekan dengan amplitudo ( $A_1$ ) pada grafik 4.10 dan 4.12 sebaran data jauh lebih tinggi, ditunjukkan dengan nilai  $R^2$  yang kurang dari 0,1 sehingga untuk data  $A_1$  belum dapat ditarik suatu korelasi.



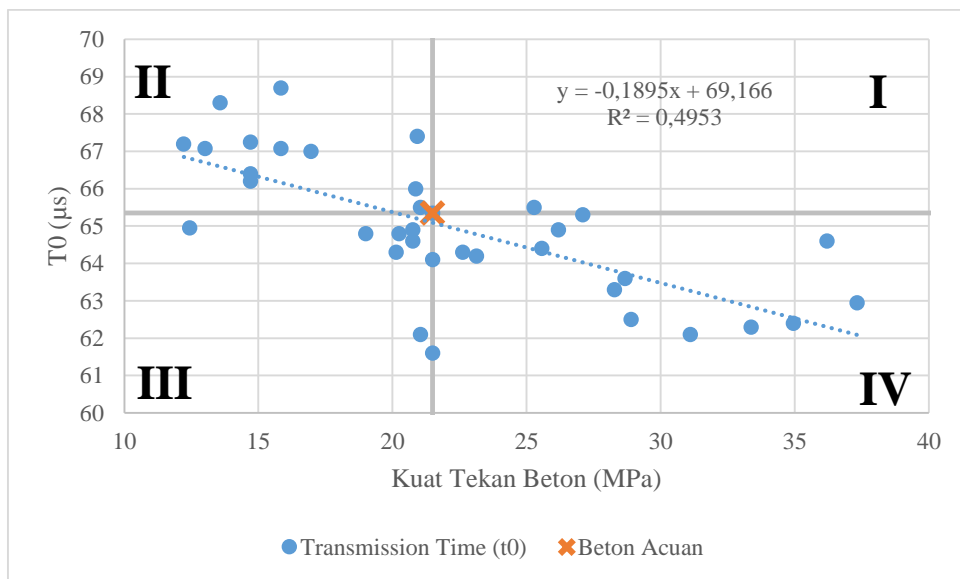
Gambar 4.9 Hubungan Kuat Tekan Beton dengan  $t_0$  (Metode TT).

Sumber: Hasil Penelitian



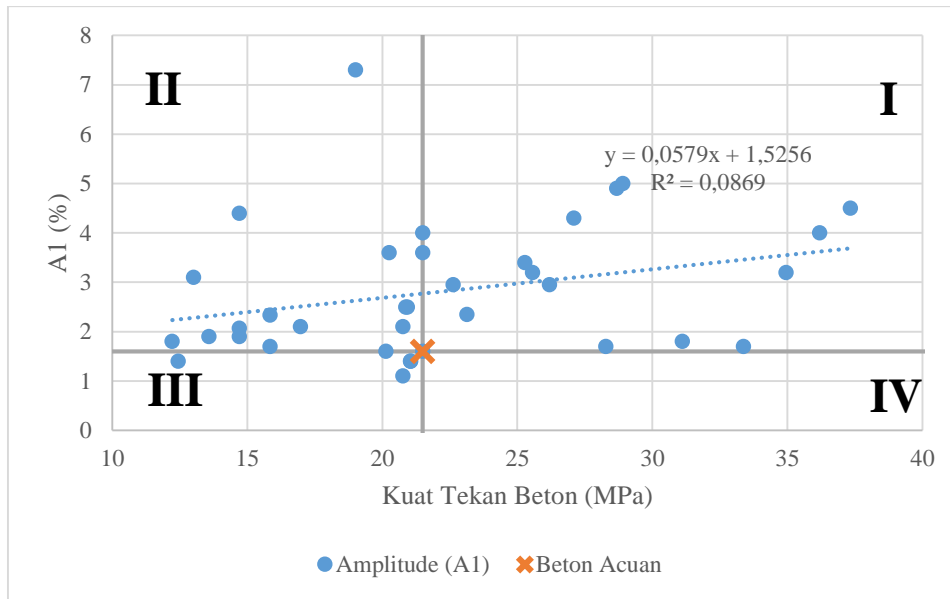
Gambar 4.10 Hubungan Kuat Tekan Beton dengan A1 (Metode TT).

Sumber: Hasil Penelitian



Gambar 4.11 Hubungan Kuat Tekan Beton dengan t0 (Metode PV).

Sumber: Hasil Penelitian



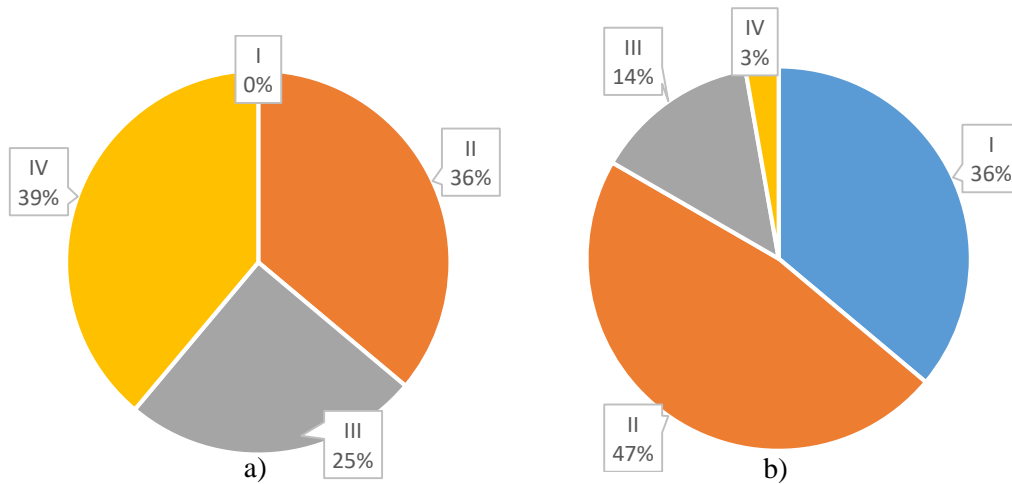
Gambar 4.12 Hubungan Kuat Tekan Beton dengan A1 (Metode PV).

Sumber: Hasil Penelitian

Selanjutnya pada grafik 4.9 – 4.12 dilakukan pembagian daerah sebaran data terhadap sampel yang dijadikan acuan. Sampel tersebut diambil dari sampel beton yang dianggap memiliki kerapatan yang relatif seragam dalam satu benda uji, dilihat dari kesamaan antara hasil pengujian kuat tekan menggunakan uji tekan (*compression test*) yang merupakan kuat tekan aktual, dengan hasil uji *hammer* yang diukur berdasarkan nilai *rebound* dan tingkat kekerasan permukaan benda uji. Sampel acuan tersebut membagi daerah sebaran data menjadi 4 kuadran dengan masing-masing kondisi yaitu sebagai berikut:

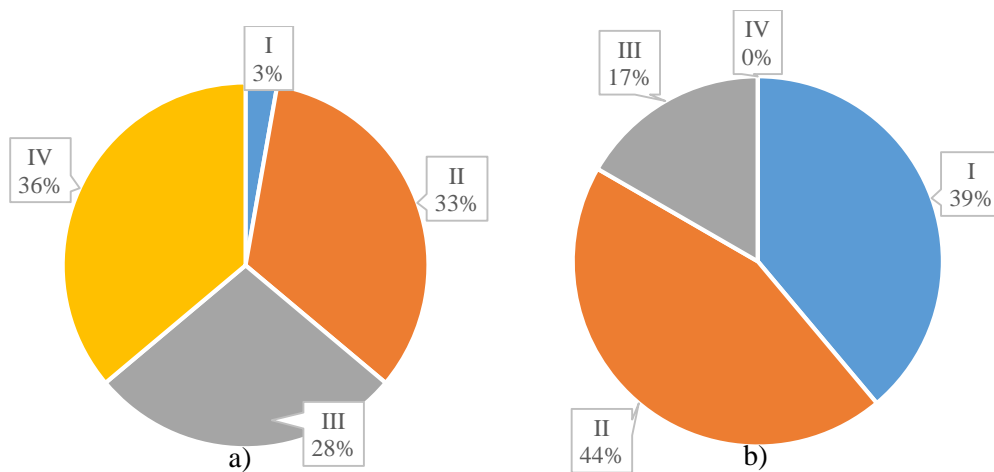
- Kuadran I: Kuat tekan > Kuat tekan acuan;  $t_0 > t_0$  acuan atau  $A1 > A1$  acuan
- Kuadran II: Kuat tekan < Kuat tekan acuan;  $t_0 > t_0$  acuan atau  $A1 > A1$  acuan
- Kuadran III: Kuat tekan < Kuat tekan acuan;  $t_0 < t_0$  acuan atau  $A1 < A1$  acuan
- Kuadran IV: Kuat tekan > Kuat tekan acuan;  $t_0 < t_0$  acuan atau  $A1 < A1$  acuan

Dari pembagian tersebut dapat dicari prosentase jumlah data yang berada pada masing-masing kuadran seperti pada grafik 4.13 – 4.14.



Gambar 4.13 Prosentase Sebaran Data di Setiap Kuadran a) t0, b) A1 (Metode TT).

Sumber: Hasil Penelitian



Gambar 4.14 Prosentase Sebaran Data di Setiap Kuadran a) t0, b) A1 (Metode PV).

Sumber: Hasil Penelitian

Dari grafik 4.13a dan 4.14a didapatkan bahwa sebaran data untuk t0 lebih dominan di kuadran II dan IV yaitu masing-masing sebanyak 36% dan 39% untuk TT serta 33% dan 36% untuk PV, yang menunjukkan bahwa kuat tekan berbanding terbalik dengan waktu transmisinya (t0). Hal ini membuktikan bahwa pada gelombang akan merambat lebih cepat (waktu transmisi yang lebih kecil) pada sampel beton yang memiliki kerapatan yang tinggi, ditunjukkan dengan kuat tekannya yang tinggi pula. Pada beton yang memiliki rongga udara, maka akan terjadi difraksi gelombang pada sekitar rongga tersebut sehingga menyebabkan waktu transmisi semakin besar karena jalur rambatannya yang berubah dari yang semula merupakan garis lurus antar pusat-pusat dari transduser.



Dari data  $t_0$  di kuadran III yang memiliki prosentase 25% (TT) dan 28% (PV), terdapat sampel yang sebarannya menyimpang cukup jauh dari garis regresi linear atau *trendline*, yakni sampel C2 dan C3 baik dari metode TT maupun PV. Terlihat bahwa kedua sampel tersebut memiliki kuat tekan masing-masing adalah 21,495 MPa dan 21,045 MPa, yang jauh lebih rendah dibanding kuat tekan aktual rata-rata benda uji dalam grup C (kuat tekan rencana 30 MPa) yaitu sebesar 30,3 MPa. Sedangkan dari hasil uji hammer serta parameter gelombangnya memiliki sebaran yang tidak terlalu jauh, yang menunjukkan bahwa seharusnya sampel tersebut memiliki kerapatan dan kuat tekan yang relatif seragam. Hal tersebut dapat disebabkan karena adanya kesalahan prosedur pengujian atau pada saat pembacaan dial uji tekan pada sampel tersebut. Faktor-faktor lain yang mempengaruhi hasil pengujian UPV antara lain ukuran, tipe, dan kandungan dari agregat dan semen, rasio air-semen, serta kelembaban dari benda uji.

Sedangkan dari grafik 4.13.b dan 4.14b menunjukkan bahwa sebaran data untuk A1 lebih dominan di kuadran II dan I, diikuti kuadran III. Namun grafik tersebut belum menunjukkan adanya pola sebaran data yang konsisten untuk hubungan kuat tekan dan amplitudo. Besarnya amplitudo yang terbaca berkaitan dengan besarnya energi dari gelombang yang diterima oleh transduser. Hal tersebut berhubungan dengan karakteristik serta perilaku beton dalam merambatkan gelombang ultrasonik. Adanya rongga maupun perbedaan partikel yang dilewati gelombang dapat menyebabkan difraksi atau refleksi serta mampu meredam energi yang dirambatkan oleh gelombang ultrasonik, sehingga mempengaruhi intensitas gelombang yang diterima oleh transduser.

Ketidakseragaman hasil pengukuran amplitudo serta kuat tekan aktual yang lebih kecil dari kuat tekan rencana tersebut membuktikan bahwa sebagian besar benda uji beton pada penelitian ini memiliki homogenitas yang rendah. Kemungkinan penyebabnya antara lain adanya rongga serta susunan agregat yang tidak seragam, yang merupakan faktor penting penunjang kekuatan dari beton. Pola kerapatan dan susunan agregat yang berbeda menyebabkan pola difraksi dan refleksi yang berbeda pula, sehingga akan mempengaruhi besarnya energi yang terbaca pada transduser. Hal ini menjadi salah satu kendala dalam penelitian ini yaitu belum dapat memastikan keseragaman dari komposisi dan susunan agregat serta kerapatan aktual dari benda uji yang diteliti.

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil pengukuran kuat tekan *compression test* terhadap benda uji silinder dengan 4 (empat) variasi *mix design* memberikan kuat tekan rata-rata masing-masing adalah 14,619 MPa; 19,993 MPa; 30,300 MPa; dan 24,024 MPa; sedangkan dari uji *hammer* didapatkan kuat tekan rata-rata antara lain 16,084 MPa; 20,612 MPa; 33,246 MPa; dan 32,139 MPa. Dari masing-masing variasi terdapat 9 (sembilan) sampel silinder yang kemudian diuji UPV dengan alat PL-200 menggunakan metode *Transmission Time* (TT) dan *Pulse Velocity* (PV). Dari hasil pengujian kuat tekan dan UPV didapatkan hubungan yang cukup kuat antara kuat tekan aktual dengan waktu transmisi ( $t_0$ ) dengan nilai koefisien determinasi  $R^2$  sebesar 0,5249 dan 0,4953 masing-masing untuk metode TT dan PV. Sedangkan dari perbandingan kuat tekan aktual dengan amplitudo awal ( $A_1$ ) tidak menunjukkan hubungan yang berarti, dengan nilai  $R^2$  yang kurang dari 0,1.
2. Dari hasil analisis antara kuat tekan dan parameter gelombang, didapatkan kesimpulan bahwa dengan dibandingkan dengan sampel beton acuan yang dianggap memiliki kerapatan yang seragam, didapatkan pola sebaran data yang dominan di mana kuat tekan relatif lebih besar maka waktu transmisinya akan relatif lebih kecil (kuadran IV), yaitu dengan prosentase jumlah sampel sebesar 39% (TT) dan 36% (PV). Kemudian untuk sampel dengan kuat tekan yang relatif rendah dan waktu transmisi relatif kecil (kuadran II) memiliki prosentase 36% (TT) dan 33% (PV). Hal ini dikarenakan perambatan gelombang akan memiliki waktu transmisi yang lebih cepat pada beton yang memiliki kerapatan tinggi yang kemungkinan besar kuat tekannya juga tinggi. Sedangkan untuk data amplitudo belum memberikan pola sebaran data yang konsisten dalam hubungannya dengan kuat tekan. Faktor penyebabnya yaitu ketidakseragaman komposisi dan susunan agregat yang menimbulkan pembacaan amplitudo yang berbeda-beda meskipun dalam satu sampel yang sama.

## 5.2 SARAN

Berdasarkan penelitian terhadap benda uji beton silinder menggunakan alat UPV, maka terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Perlunya kontrol yang lebih baik terhadap komposisi material dan proses pencampuran beton untuk mencegah pengaruh dari faktor-faktor lain yang tidak diinginkan.
2. Perlunya penambahan jumlah sampel agar regresi serta korelasi yang didapatkan dapat digunakan untuk penelitian serta penggunaan secara umum.
3. Perlu diperhatikan kestabilan transduser serta jumlah cairan couplant saat melakukan pengujian UPV.
4. Dalam pengambilan data amplitudo, dapat memanfaatkan fitur *Amplitude marker* dari alat PUNDIT PL-200 pada menu *Amplitude Analysis*, yang berfungsi merekam data amplitudo awal secara otomatis untuk digunakan dalam analisis amplitudo.

## DAFTAR PUSTAKA

- B. Sanish, K & Santhanam, Manu. (2012). Characterization of Strength Development of Concrete Using Ultrasonic Method. Makalah dalam *18th World Conference on Non-destructive Testing*, Durban, South Africa, 16-20 April 2012.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (1997). *Fundamentals of Physics* (5th ed., extended.). New York: Wiley.
- International Atomic Energy Agency, Vienna. (2002). *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Training Course Series No. 17*.
- Mattacchione, Angelo & Mattacchione, Livia. (1995). Correlation Between 28-Day Strength and Density. *Concrete International*. XVII (3): 37-41.
- Malhotra, V.M. & Carino, N.J. (2004). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. Boca Raton: CRC Press.
- McCormac, Jack C. (2004). *Desain Beton Bertulang Jilid 1* (Edisi Kelima). Jakarta : Erlangga
- Nurlina, Siti. (2011). *Teknologi Bahan I*. Malang: Bargie Media.
- PROCEQ. (2014). *Pundit PL-200 and PE Ultrasonic Training*. Switzerland : Proceq.
- Suseno, Hendro. (2010). *Bahan Bangunan untuk Teknik Sipil*. Malang: Bargie Media.
- Trtnik, Gregor et al. (2007). Prediction of Concrete Strength Using Ultrasonic Pulse Velocity and Artificial Neural Networks. *Ultrasonics Journal*. 2009 (49): 53-60.
- Yaman, Ismail Ozgur et al. (2001). Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Using Direct and Indirect Transmission. *ACI Materials Journal*. November-Desember 2001 (48): 450-457.

(halaman ini sengaja dikosongkan)